



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - YLEMPI AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# SILTARAKENTEIDEN KANTAVUUDEN MÄÄRITYS

FEM-pohjaisen ohjelmiston avulla

TEKIJÄ: Harri Tarasmaa

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Harri Tarasmaa	
Työn nimi Siltarakenteiden kantavuuden määrittäminen, FEM-pohjaisen ohjelmiston avulla	
Päiväys 1.5.2018	Sivumäärä/Liitteet 72
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja Arto Puurula, TkT, rakennetekniikan lehtori; Matti Mikkonen, Lehtori, DI	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Destia Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli syventää ymmärrystä siltojen kantavuuslaskentaan liittyvissä asioissa ja <i>Lusas</i> laskentaohjelmiston käytössä. Opinnäytetyön aiheena oli perehtyä Suomen siltojen kuntoon, tutustua siltojen kantavuuslaskentaan kokonaisuutena ja esitellä kantavuuslaskentaa esimerkkien avulla sekä perehtyä <i>Lusas</i> laskentaohjelmistoon. Pääsuuntaus työssä oli siltojen kantavuuslaskennassa ja <i>Lusas</i> ohjelmiston käytössä ja toimivien rakennemallien luonnissa.</p> <p>Opinnäytetyössä kantavuuslaskentaa tarkasteltiin betonisiltojen näkökulmasta. Tarkasteltavina oli kaksi erilaista betonista siltaa. Toinen oli betoninen laattasilta ja toinen betoninen kotelopalkkisilta. Näistä kohteista pyrittiin muodostamaan mahdollisimman hyvin todellisuutta kuvaavat rakennemallit <i>Lusas</i> ohjelmistolla. <i>Lusas</i> ohjelmistosta saatujen rasiusten perusteella arvioitiin rakenneosien kantokykyä.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena osataan suorittaa betonisille siltarakenteille kantavuustarkasteluja <i>Lusas</i> ohjelmistolla. Lisäksi todettiin millaisia vaikeuksia rakennemallien luonnissa ja niistä saaduissa tuloksissa ilmenee FEM-laskennassa. Näistä hankaluuksista tehtiin johtopäätökset ja mietittiin miten rakennemalleista ja niiden tuloksista saisi todellisuutta kuvaavat.</p>	
Avainsanat FEM, kantavuuslaskenta, silta, <i>Lusas</i>	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Harri Tarasmaa			
Title of Thesis Calculating the Bridge Load Capacity with FEM-program			
Date	May 1, 2018	Pages/Appendices	72
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, Principal Lecturer PhD; Mr Matti Mikkonen, Senior Lecturer			
Client Organisation /Partners Destia Oy			
<p>Abstract</p> <p>The general purpose of this final project was to better understand the load capacity calculations of bridges and the use of <i>Lusas</i>-software (a program based on finite element method/FEM). The main focus of the study was to get acquainted with the condition of Finnish bridges, bridge load capacity calculations and to present case examples that were used in the calculations. The main purpose was to find out how to perform load capacity calculations, learn the use of <i>Lusas</i>-software and how to make reliable structure models with <i>Lusas</i>.</p> <p>The study focuses on concrete bridges and their load capacity calculations. The load capacity calculations were made for two bridges, a concrete slab bridge and a box-section girder bridge. In these cases structural models were created as realistic as possible with the <i>Lusas</i>-software. The load-bearing capacity of structures was estimated based on the stresses calculated from the structural models.</p> <p>As a result of the study it was found out that the load capacity of concrete bridges can be calculated with the <i>Lusas</i>-software. It was also discovered what kind of challenges there are in creating structural models and in the FEM-calculations. The outcome of the thesis was how to tackle these challenges and how to create structural models in a way that the FEM-calculations produce the most realistic results.</p>			
Keywords FEM, capacity calculation, bridge, <i>Lusas</i> -software			

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
1.1	Työn tausta .....	6
1.2	Työn tavoitteet ja rajaukset .....	6
1.3	Nykytilanne .....	7
2	HAASTATTELU POHJOIS-SAVON ELY-KESKUKSEN KANSSA .....	11
3	KANTAVUUSLASKENNAN SUORITTAMINEN .....	11
3.1	Ohjeistukset .....	11
3.2	Lähtökohdat .....	11
3.3	Kuormitukset .....	12
3.4	Mitoitus .....	16
3.4.1	Yleistä .....	16
3.4.2	Murtorajatila .....	16
3.4.3	Käyttörajatila .....	18
3.5	Muut rakenteelliset asiat .....	19
3.6	Mallinnusohjelmat .....	19
4	KANTAVUUSLASKENTA KOHTEET .....	21
4.1	CASE 1, Betoninen laattasilta .....	21
4.1.1	Lähtötiedot .....	21
4.1.2	kantavuuslaskennan lähtökohdat .....	23
4.1.3	Rakennanalyysi .....	25
4.1.4	Mitoitus .....	27
4.1.5	Ylimääräinen tarkastelu .....	29
4.2	CASE 2, Betoninen kotelopalkkisilta .....	30
4.2.1	Lähtökohta .....	30
4.2.2	Siltarakenne .....	30
4.2.3	Mallin rakentaminen .....	34
4.2.4	Tarkasteltavat mallit .....	36
4.2.5	Mallien sisältö .....	41
4.2.6	Kapasiteetin määrittäminen .....	42
4.2.7	Tulokset .....	21
4.2.8	Huomiot, poikkeukset ja jatkotoimenpiteet .....	46

4.2.9 Yhteenveto .....	47
5 YHTEENVETO.....	48
LÄHTEET .....	49
LIITE 1: TUOTETUS AINEISTOT .....	50
LIITE 2: LAATTASILLAN RASITUSKUVAAJAT .....	51
LIITE 3: KOTELOPALKKISILLAN RASITUSKUVAAJAT .....	58

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Opinnäytetyö sai ensiaskeleensa keväällä 2015. Liikennevirasto järjesti tällöin kantavuuslaskentoihin liittyvän koulutuksen Helsingissä. Koulutuksessa kävi ilmi, että Suomessa on n.4800 siltaa, jotka ovat niin sanotulla harmaalla alueella kantavuuksiensa suhteen nykyisille uusille tieliikennekuormille. Harmaalla alueella tarkoitetaan aluetta, jossa aiemmat siltojen suunnittelukuormat ovat hyvin lähellä nykyisiä suurimpia sallittuja ajoneuvojakuormituksia, mutta eivät välttämättä täytä kokonaisuudessaan nykyisten kuormien vaatimuksia. Siltojen kantavuuksien määrittämisellä tulee tästä johtuen olemaan kasvava rooli Suomen tiestöllä tulevinä vuosina.

Opinnäytetyö on tehty Destia Oy:lle. Destia on infrarakennusyhtiö, jonka palveluksessa toimii vakituisesti n. 1500 rakennesalan ammattilaista. Destia rakentaa, suunnittelee ja ylläpitää muun muassa liikenneväyliä, rata- ja teollisuusympäristöjä sekä maanalaisia rakenteita ympäri Suomen. Destian asiakkaina ovat teollisuus- ja liikeyritykset, kunnat ja kaupungit sekä valtiohallinnon organisaatiot kuten Liikennevirasto.

## 1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

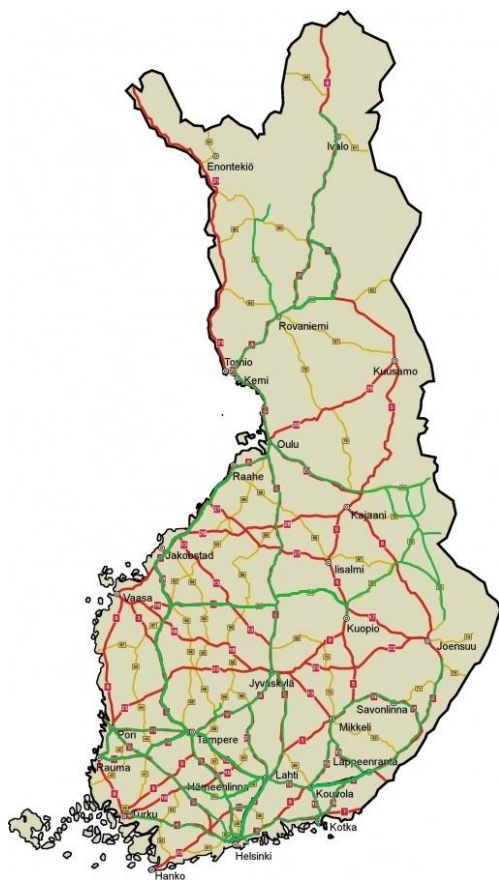
Opinnäytetyössä pyritään kehittämään siltojen kantavuuslaskentaa FEM-pohjaisella Lusas Bridge plus ohjelmistolla. Opinnäytetyö keskittyy betonisiin siltakohteisiin, joissa kantavuuslaskentaan liittyvää kehitystä pyritään toteuttamaan Liikenneviraston julkaisemien ohjeiden mukaisesti. Opinnäytetyössä pyritään kuvaamaan, kuinka kantavuuslaskentaa on tehty ja tarkastelemaan kantavuuslaskentaa kokonaisuudessaan. Varsinaiset kantavuuslaskennat ovat luottamuksellista tietoa, joten ne jäävät pelkästään työnantajan käyttöön (Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje, 12).

Kantavuuslaskenta esimerkkikohteissa on käytetty sekä Liikenneviraston julkaiseman kantavuuslaskentaohjeen kommenttiversiota että varsinaista voimaan tullutta kantavuuslaskentaohjetta. Opinnäytetyössä määriteltävät kantavuuslaskenta ohjeistuksien asiat, tulevat tästä voimassa olevasta kantavuuslaskentaohjeesta, ellei toisin mainita. Ensimmäinen tarkastelukohde on suoritettu syksyllä 2015 ja sitä tehdessä on käytetty kantavuuslaskentaohjeen kommenttiversioita. Opinnäytetyötä tehtäessä ei ole lähdetty huomioimaan ohjeistusten välisiä mahdollisia ristiriitaisuuksia. Toisessa esimerkkikohteessa pyritään kehittämään mahdollisimman luotettava laskentamalli kotelopalkkisillasta. Opinnäytetyössä ei käsitellä kaikkia mahdollisia tarkasteluja kantavuuslaskentaohjeen mukaisesti, vaan pyritään luomaan luotettava laskentamalli, josta voidaan kohteen kantavuusasioita määrittää. Kohteesta ei muodosteta lopullista käsitystä, voisiko kyseisen esimerkkikohteen jättää yleiselle liikenteelle avoimeksi tai tulisko kohteelle määrittää painorajoituksia.

Opinnäytetyössä tullaan käsittelemään tiesiltoihin liittyviä asioita perustuen määriteltyihin AA13 ajoneuvoyhdistelyihin. Mahdollisiin erikoiskuljetuskaavioihin tai rautatiesilta asioihin opinnäytetyössä ei mennä. Myöskään silta rakenteiden geoteknisiin asioihin opinnäytetyössä ei mennä.

### 1.3 Nykytilanne

Nykyisin suurimmat sallitut ajoneuvokuormat yleisellä tiestöllä ilman erillistä lupaa on 76 tn, joka koostuu 19,3m pitkästä ajoneuvoyhdistelystä. Tätä suuremmille ajoneuvoille täytyy hakea erilliset luvat tiestöllä liikkumista varten. Trafi on myöntänyt toistaiseksi kokeilulupia yhteensä 40 kpl:lle suuria yhdistelmiä. Näistä yli 25 m pitkiä yhdistelmiä on 28 kpl, joista 18 on kokonaismassaltaan yli 76 tonnia. 5 yhdistelmää on 5+5 akselisia n.25m pitkiä yhdistelmiä ja näiden yhdistelmien kokonaismassa on 84 tn, tätä pidempiä ja raskaampia puoliperävaunuyhdistelmiä on 7 kpl. Lisäksi Trafilla on käsittelyssä yli kymmenen hakemusta suurien yhdistelmien käyttökokeisiin liittyen (ajankohta 22.11.2017). Lisää näistä luvista voi lukea Trafilla sivuilta ([www.trafi.fi/tieliikenne](http://www.trafi.fi/tieliikenne)). Kuvaan 1. on merkattu vihreällä kaikkien suurien yhdistelmien nykyiset reitit. Suurin yhdistelmä liikkuu tällä hetkellä Inari-Rovaniemi-Kemi -reitillä. Reitillä liikennöi 33 metrinen, jopa 100tn painava 13-akselinen puurekka (kuva 2).



Kuva 1. Suurien HCT-rekkojen (high capacity transport) sallitut kulkureitit Suomessa.

On todennäköistä, että suurien HCT-rekkojen (high capacity transport) määrä kasvaa entisestään tulevaisuudessa. Kokeilujaksojen edetessä on luultavaa, että yhä useampi kuljetusliike alkaa kasvattaa ajoneuvojensa kokoa vedoten pienempiin ajoneuvokustannuksiin, joita suuremmat kuljetusmäärät voivat mahdollistaa. Samalla kun Suomen tiestön korjausvelka kasvaa ja siltojen kunto rapistuu, on sanomatta selvää, että kantavuustarkastelut nousevat yhä suurempaan merkitykseen myönnettäessä lupia entistä suuremmille kuljetusajoneuvoille.



*Kuva 2. Kuvassa suurin tällä hetkellä Suomessa liikennöivä 100tn puurekka.*



## 2 HAASTATTELU POHJOIS-SAVON ELY-KESKUKSEN KANSSA

Opinnäytetyötä varten käytiin haastattelemassa Pohjois-Savon ELY:n siltainsinööriä Seppo Ryytästä, liittyen siltojen kantavuus ja kunto asioihin kyseisen ELY-keskuksen vastuu alueella. Haastattelussa kartoitettiin siltojen nykytilaa, silloilla liikennöivien raskaiden kuljetusten määrää ja tulevaisuudennäkymiä liikenteen kehittämisessä. Lisäksi käsiteltiin Liikenneviraston ja ELY-keskuksen välistä vuorovaikutusta nyt ja tulevaisuudessa. Yleisesti ottaen Liikennevirasto omistaa kaikki yleisten teiden sillat. ELY-keskusten tehtävänä on näiden siltojen ylläpito. Pienen osan silloista omistavat kaupungit ja kunnat sekä yksityistiekunnat tai muut yksityiset tahot. Liikennevirasto asettaa siltojen kuntotavoitteen, joka käsitellään vuosittain tulosneuvotteluissa yhdessä ELY-keskusten kanssa. Kuntotavoitteisiin kuuluu huonokuntoisten sekä painorajoitettujen siltojen määrä. Lisäksi ELY-keskuksilla on määritetty siltayhteyshenkilö Liikennevirastossa. Tämä yhteyshenkilö käy vähintään kerran vuodessa vastuullaan olevassa ELY-keskuksessa keskustelemassa silta-asioista kuten korjauskohteista ja huonokuntoisista silloista. Lisäksi Pohjois-Savon ELY:n alueella on tarkastettu maastossa siltojen kantavuuksia Liikenneviraston kantavuusasiantuntijan laatiman ohjelman mukaisesti.

Pohjois-Savon ELY-keskuksen alueella on yhteensä 2224 kpl siltoja (1.1.2018). Liikennevirasto julkaisee vuosittain tilastot omistamista silloista. Vuoden 2017 julkaisun "Liikenneviraston tilastoja 8/2017, Liikenneviraston sillat 1.1.2017" mukaan sillat jakaantuvat seuraavasti, teräsbetoniset sillat 1209 kpl, jännitetyt betonisillat 134 kpl, terässillat 108 kpl, puiset sillat 155 kpl, kivisillat 17 kpl ja putkisillat 596 kpl. Pieni ero siltojen kokonaismäärässä johtuu vuoden aikana tapahtuneista muutoksista.

Vuosittain Pohjois-Savon ELY-keskuksen silloista uusitaan varsinkin putki- ja puusiltoja, joita on paljon suhteessa muihin ELY-keskus alueisiin. Arviolta vuosittain uusitaan 5-10 kpl putkisiltoja ja 1-2 puusiltaa. Hankaluutta varsinkin putkisiltojen kunnon arvioinnin kannalta aiheuttaa uusi Taitorakennerekisteri, joka korvasi vanhan Siltarekisterin keväällä 2017. Kokonaisuudessaan Taitorakennerekisteri on helpompi käyttöinen kuin vanha Siltarekisteri, mutta siltojen kunnon arviointi aiheuttaa vielä hankaluuksia. Taitorakennerekisterissä sillat jaetaan kuntoluokkiin KL1-KL5. Jaottelussa KL1-luokka tarkoittaa erittäin huonossa kunnossa olevaa siltaa ja KL5 erittäin hyvässä kunnossa olevaa. Kaikista silloista Pohjois-Savon ELY:n alueella KL1 ja KL2 luokkaan kuuluu yhteensä 97 kpl siltoja (1.1.2018). Painorajoitettuja siltoja on yhteensä 55 kpl. Painorajoituksia on annettu sekä yksittäiselle akselille, 2- ja 3-akselisille teleille, ajoneuvolle sekä ajoneuvoyhdistelmälle.

Määrällisesti eniten siltoja Pohjois-Savon ELY:n alueelle on rakennettu 1930-, 1960- ja 1970-luvuilla. 1930-luvulla siltoja on rakennettu 155 kpl, 1960-luvulla 372 kpl ja 1970-luvulla 484 kpl. Näistä varsinkin 60-luvulla Ak1 suunnittelukuorman silloille olisi tarpeellista tehdä korjaussuunnittelun yhteydessä kantavuustarkasteluja. Varsinkin päätien silloille, joita on arviolta 54 kpl. Kuntonsa puolesta kiireellisiä kohteita, joille kantavuustarkasteluja tulisi tehdä on Pohjois-Savon ELY:n alueella muutamia betoni- ja puusiltoja. Joissakin siltakohteissa normaalia kunnossapito tarkastusväliä on tarpeen mukaan tihennetty, mutta tehostetussa tarkkailussa olevia siltoja ei tällä hetkellä esiinny. On kuitenkin

kin huomattava, että Pohjois-Savon ELY:n alueen pääteillä eli valta- ja kantateillä esiintyy nykyisin jo 20 huonokuntoista siltaa, joista 4 kpl on putkisiltoja.

Nykyisin Suomessa on alkanut liikennöimään myös suurempia kuin 76 tn painavia ajoneuvoja. Näitä niin sanottuja HCT-kuljetuksia liikennöi myös Pohjois-Savon ELY:n alueella. Yhteensä siltoja näillä reiteillä on 338kpl, joista putkisiltoja ja teräsholveja on 38 kpl. Suurin osa silloista on keskittynyt Vt5 valtatielle. Muita keskeisiä väyliä, joilla raskasta kalustoa liikkuu sekä on paljon siltoja ovat Vt14, Vt6 ja Kt 75. Pohjois-Savon ELY:n Tienpidon suunnittelun Yksikön päällikkö Mirko Juppi arvioikin raskaiden kuljetuksien kasvavan edelleen tulevaisuudessa. Varsinkin jos Sorsasaloon aiottu Finnpulpanke Savon Sellun viereen toteutuu.

Vuonna 2020 ELY-keskukset muuttuvat maakunniksi ja tämä aiheuttanee muutoksia myös siltojen kunnossapidon kannalta. Mirko Juppi arvioi suurimmaksi muutokseksi rahoituksen jakamisen maakunnittain nykyisten ELY-L- toimialueiden sijaan. Jupin mukaan nykyinen malli on mahdollistanut Pohjois Savon ELY:ssä kolmen maakunnan kokoisella toimialueella joustavamman ohjelmoinnin sekä isompien sillankorjauskohteiden toteutuksen. Jatkossa entistä pienemmät siltakohteet päätyvät rahoitettavaksi keskitetysti Väyläviraston harkinnan mukaan, kun maakuntien kehykset eivät riitä niiden toteutukseen. Positiivista muutoksessa maakunniksi on, että nykyisenlainen hankinta-aluemalli purkautuu. Tämä mahdollistaa ohjelmoinnin, suunnittelun ja rakennuttamisen saman organisaation käsiin.

Siltojen kunnossapitoon käytettävät määrärahat ovat pienentyneet vuosien saatossa. Nykyisin Pohjois-Savon ELY:llä siltojen kunnossa pitoon on käytettävissään 4 miljoonaa euroa vuodessa. Tänä vuonna valtiovallan osoittamalla ylimääräisellä korjausvelkarakahalla on tarkoitus uusia 3 siltaa. Liikennevirasto on menneinä vuosina myöntänyt myös ylimääräistä "Massat ja mitat" rahoitusta, jolla on voitu uusia muun muassa painorajoitettuja siltoja, mutta tänä vuonna tätä ylimääräistä rahaa ei kuitenkaan ole. Nykyinen ajoneuvojen kuormien nostaminen on sietämätöntä nykyisillä sillankorjausrahoilla. Jatkossa on mahdollista, että näistä kuormien korotuksista johtuen voidaan joutua painorajoituksia asettamaan myös pääteiden silloille. Nykyisellä korjaustominnan perusrahoituksella korjataankin yleensä pelkästään huonokuntoisia siltoja, eikä muihin kunnossapito tarpeisiin ole mahdollisuuksia.

Viime vuosina Suomessa on havahduttu ilmiöön, jossa betonirakentamisessa on löydetty betonin lujuuden aliehehtymistä. Tämän seurauksena uusiakin betonikohteita on jouduttu purkamaan kokonaan. Myös silloissa on havaittu tällaisia lujuuden alituksia. Pohjois-Savon ELY-keskuksen alueen silloille on suoritettu tutkimuksia 2016 ja 2017 aikana. Vuoden 2016 tutkimuksissa mukana olleista silloista ei ole löydetty lujuuden alituksia. Vuoden 2017 kohteista ei opinnäytetyön teon aikana ole vielä tuloksia valmistunut.

### 3 KANTAVUUSLASKENNAN SUORITTAMINEN

#### 3.1 Ohjeistukset

Uusin ohjeistus siltojen kantavuuslaskennalle on Liikenneviraston ohje *Siltojen kantavuuslaskentaohje, Liikenneviraston ohjeita 36/2015*. Tämä ohjeistus on astunut voimaan 1.2.2016 alkaen. Ohje määrittää kantavuuslaskennan ehdot. Muut asiat, joita ei tässä kantavuuslaskentaohjeessa määritetä menevät Liikenneviraston muiden ohjeistusten ja eurokoodien mukaan. Liikenneviraston muista ohjeistuksista merkittävimmät ovat NCCI sarjan jäsenet, jotka käsittelevät siltojen kuormituksia, betoni- teräs- ja puusiltojen suunnittelun ohjeita ja geoteknisiä asioita siltoihin liittyen.

#### 3.2 Lähtökohdat

Liikenneviraston julkaisema *Siltojen kantavuuslaskentaohje 36/2015* on tarkoitettu olemassa olevien tie-, rautatie- ja katusiltojen kantavuuden määrittämiselle tavanomaiselle liikenteelle tai erikoiskuljetuksille. Ohjeessa esitetyt kantavuustarkastelut koskevat pääosin siltoja, joissa ei ole kantavuuteen vaikuttavia vaurioita. Tilaaja määrittää kantavuuslaskentojen laajuuden ja käytettävät liikennekuormat kohdekohtaisesti (Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje). Laskennan laajuus jaetaan kahteen tarkastelutasoon. Ensimmäinen taso on epätarkempi menetelmä, jossa lähinnä vertaillaan kohteen suunnittelun aikaisia ja kantavuuden määrittämisessä käytettäviä kuormituksia ja näistä aiheutuvia rasituksia keskenään. Toinen taso on tarkempi, jossa voimasuureet muodostetaan tarkalla rakennemallilla huomioiden todelliset mitat ja kuormat. Kantavuuslaskentaohje käsittelee lähinnä tätä tarkempaa menettelytapaa ja tätä tapaa myös noudatetaan opinnäytetyön kohteissa.

Lähdettäessä muodostamaan tätä tarkempaa rakennemallia täytyy huomioida miten rakentamisessa käytettävät materiaalit ja niiden ominaisuudet ovat muuttuneet aikojen saatossa. Kantavuuslaskentaohje määrittelee eri aikakausien materiaaliominaisuuksia betonille, betoni- jänne- ja rakenneteräksille sekä puulle ja kivelle. Materiaalien osavarmuusluvut laskentaa varten määrittyvät sen mukaan, onko kohteesta tehty tarkempia tutkimuksia rakennetta koskien vai tulevatko kyseiset ominaisuus ja muut tiedot olemassa olevista suunnitelmista. Esimerkki tästä kuvassa 3. jossa betonille on määritetty osavarmuusluvut (Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje, 14).

Taulukko 2.2. Betonin osavarmuusluvut.

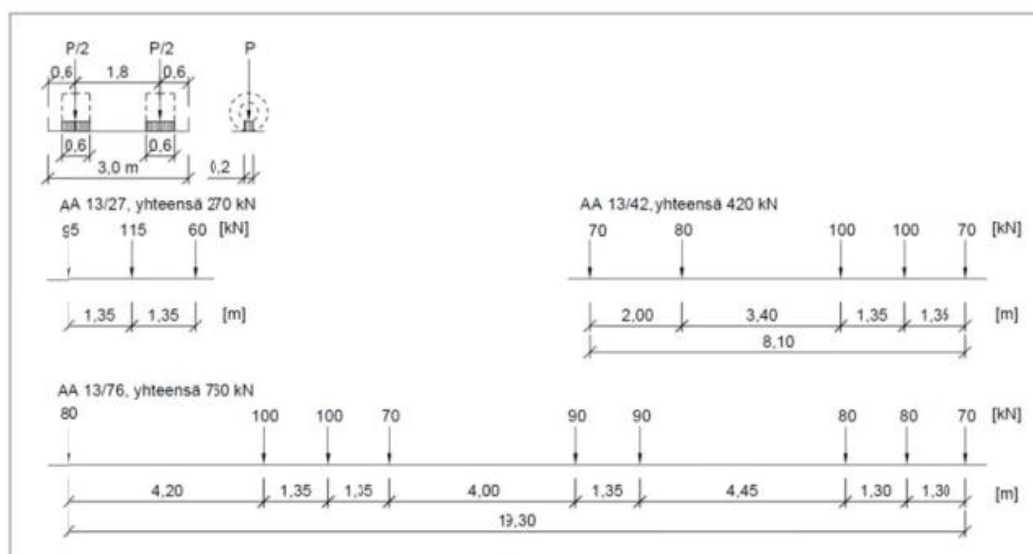
Betonin osavarmuusluku $\gamma_c$	Rakenteen mitat perustuvat vain suunnitelmiin	Rakenteen mitat on mitattu kantavuuden kannalta kriittisissä kohdissa
Betonin lujuus perustuu suunnitelmissa esitettyihin arvoihin. Vauriokartoitusta ei ole tehty.	1,35	1,30
Betonin lujuus on selvitetty kattavasti koekappalein. Erikoistarkastuksessa ei ole havaittu rakenteellisia vaurioita.	1,30	1,25

kuva 3. betonin osavarmuusluvut.

### 3.3 Kuormitukset

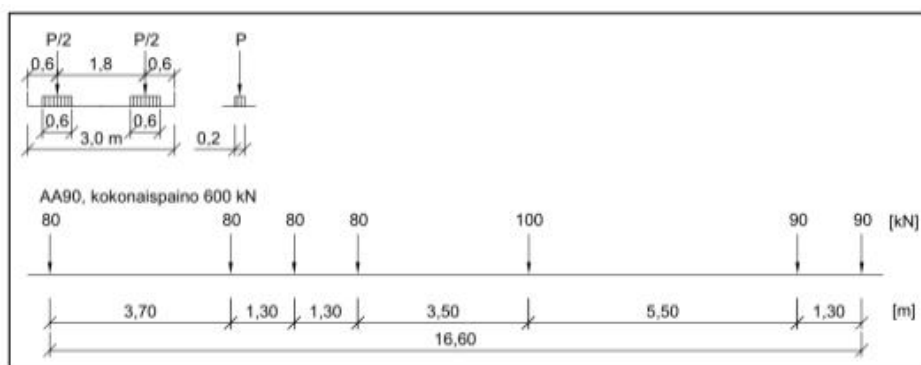
Kantavuuslaskennassa huomioitavat kuormitukset ovat erilaiset kuin nykyiset uusien siltojen suunnittelussa käytettävät. Uusien siltojen suunnittelussa käytetään NCCI-1 ohjeen mukaisia kuormituksia. Nämä kuormitukset huomioivat mahdolliset tieliikenteen kuormien kasvut tulevaisuudessa. Näin ollen nämä kuormat (LM1, LM2 ja LM3) muodostuvat suuremmiksi kuin kantavuuslaskennan AA13 ajoneuvoasetuksen kuormat. Yleinen suunnittelu käyttöikä uusille silloille on 100v. Tästä johtuen uusissa suunnittelukuormissa tuleekin huomioida mahdolliset kuormien kasvut tulevaisuudessa.

Seuraavaksi käydään läpi tarkemmin näitä AA13 kuormituksia ja varsinkin ajoneuvokuormituksia. Samalla esitetään kantavuuslaskennan eteneminen ajoneuvokuormien perusteella, jotka määrittävät tulisiko sillalle asettaa painorajoituksia vai voiko silta jäädä painorajoittamattomaksi. Suurimpien sallittujen Suomen yleisellä tiestöllä liikennöivien ajoneuvojen kokonaispaino saa olla tällä hetkellä 76 tn. Kantavuuslaskentaohje määrittelee Ajoneuvoasetuksen AA13, joka vastaa vuonna 2013 voimaan tulleen ajoneuvoasetuksen suurimpien sallittujen ajoneuvoyhdistelmien akseli-, teli- ja kokonaispainoja (Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje). Kyseiset AA13 mukaiset kuormakaaviot on esitetty kuvassa 4.



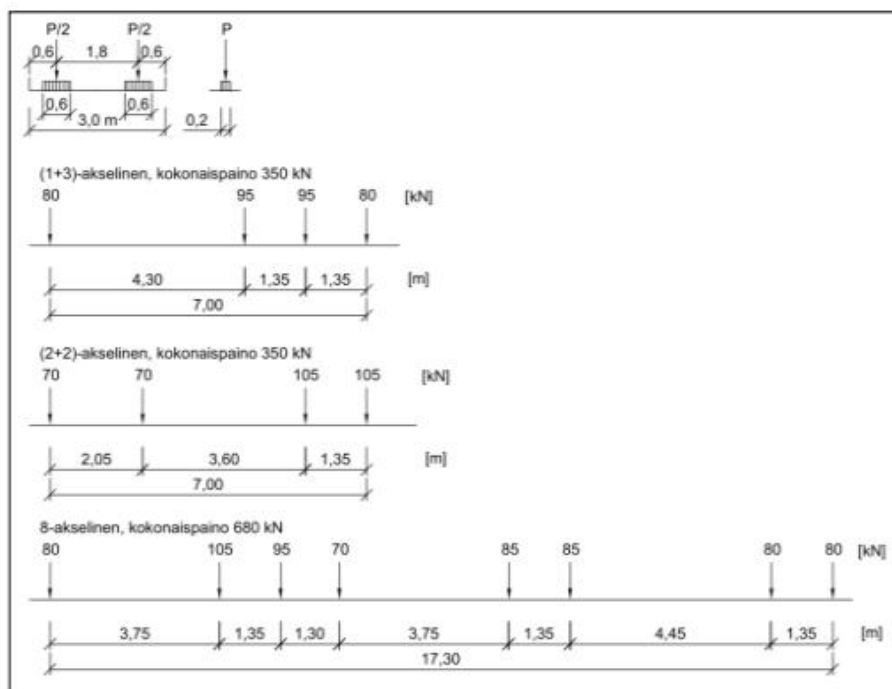
Kuva 4. Ajoneuvoasetuksen 2013 mukaiset kuormakaaviot AA13/27, AA 13/42 sekä AA 13/76.

Kantavuuslaskentakohteen tulisi kestää AA13 mukaiset ajoneuvoyhdistelmät, mikäli kohde halutaan jättää avoimeksi yleiselle liikenteelle. Muussa tapauksessa kohteelle tulee määrittää paino- tai muita rajoituksia. Mikäli kantavuuslaskennan lopputulos on, ettei kohde kestä AA13 kuormituksia tai laskentavaiheen alussa voidaan epäillä suoraan, ettei siltakohte tule kestäämään AA13 mukaisia kuormituksia tulee seuraavaksi siirtyä tutkimaan AA90 mukaista kuormakaaviota. AA90 mukainen kuormakaavio on esitetty kuvassa 5.



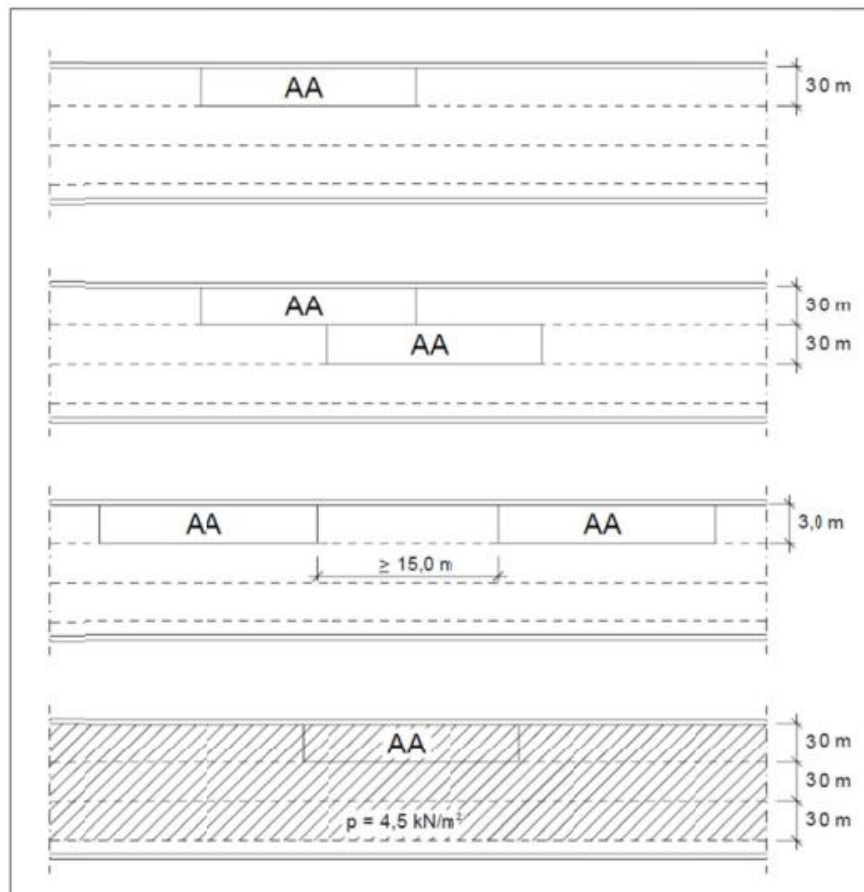
Kuva 5. Vuoden 1990 ajoneuvoasetuksen mukainen kuormakaavio AA90.

Mikäli kohde tulee kestämään AA90 kuormituksen, voidaan sille määrittää painorajoitus kuvan 6. kaavioiden avulla. Mikäli kohde todetaan olevan riittämätön kantavuutensa puolesta AA90 kaaviolle, tulee kohteen jatkosta sopia erikseen tilaajan kanssa. Tilaaja voi myös tarvittaessa määrittää erillisen kuormitusyhdistelyn niin sanotun erikoiskuljetuksen, joka kohteesta tulee tutkia.



Kuva 6. Sillan painorajoituksen määrittämisessä käytettävät kaaviot.

Kantavuuslaskentaohje määrittelee, mitenkä kyseiset AA13 ajoneuvoyhdistelmät voivat sijaita sillakannen päällä. Sillakannella voi vaikuttaa yhtäaikaisesti yksittäinen AA kuorma, yksittäinen AA kuorma ja tasainen kuorma tai kaksi AA kuormaa yhtä aikaa. Kuvassa 7. on esitetty kuormien esiintyminen. AA ajoneuvo kuorman kanssa voi sijaita sillakannella myös tasaisesti jakautunut  $4,5\text{kN/m}^2$  kuorma. Tällöin kannella voi sijaita vain yksi AA ajoneuvokuormitus



Kuva 7. Ajoneuvoasetuksen mukaisten kuormien sijoittelu sillalla.

On myös huomioitava, että näihin ajoneuvokuormituksiin tulee lisätä sysäyslisäkerroin, joka vastaa ajoneuvon akseleista siltarakenteisiin syntyviä dynaamisia vaikutuksia. Sysäyskerroimen kaava on esitetty alempana (kaava 1).

$$\phi = 1,40 - 0,006 \cdot L \geq 1,1$$

kaava 1.

Jossa L on tarkasteltavan rakenneosan jännemitta tai ulokkeen pituus

Ajoneuvokuormitusten lisäksi muita kantavuuslaskennassa huomioitavia kuormia kohteesta riippuen ovat:

- jännittäminen (sisältää jännityshäviöt)
- betonin viruma ja kutistuma
- tukipainuma
- rakentamisen aikaiset kuormat
- maanpaine
- lämpötilakuormat
- keskipakokuormat
- liikenteen aiheuttama maanpaine
- väsyttävät kuormat

Lisäksi voidaan huomioida luonnonkuormat, joilla oletetaan olevan merkittävä vaikutus sillan kantavuuteen (sovittava tilaajan kanssa):

- tuuli
- jää
- virtaus
- lumi

Kun kohteen tarkastelutaso, alustavat ajoneuvokuormitukset sekä muut kuormitukset ovat selvillä, voidaan siirtyä tutkimaan rakennetta kantavuuden osalta.

### 3.4 Mitoitus

#### 3.4.1 Yleistä

Siltojen kantavuuslaskennassa käytettävät kuormien yhdistelykaavat, yhdistelykertoimet ja osavarmuusluvut poikkeavat monessa tapauksessa uusille silloille tarkoitetuista arvoista (Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje, 35). Kantavuuslaskennassa kuormia tarkastellaan sekä murto että käyttörajatilassa. Uusille silloille tehtävissä yhdistelyissä yhdistelykertoimet ovat erilaiset ja niitä tarkastellaan sekä murto että käyttörajatilassa ja onnettomuustilanteessa. Uusien siltojen yhdistelyissä käyttörajatila jaetaan vielä ominais-, tavallinen- ja pitkäaikaisyhdistelyihin. Uusien siltojen suunnittelussa tarkasteltavia yhdistelyjä muodostuu siis selvästi enemmän kuin kantavuuslaskennassa.

#### 3.4.2 Murtorajatila

Kantavuuslaskennassa rakenteet tarkastellaan aluksi murtorajatilassa (Ultimate Limit State). Sekundäärirakenteissa, joissa vaurioituminen on paikallista ja se ei johda päärakenteen vaurioitumiseen tai liikenneturvallisuuden vaarantumiseen, voidaan rakenteen kestävyyttä arvioitaessa käyttää alennettuja kuormien osavarmuuslukuja. Alennettujen osavarmuuslukujen käyttäminen päärakenteiden kestävyyslaskennassa edellyttää, että kyseessä on loppuun käytettävä silta, jossa ei ole kantaavuuteen vaikuttavia vaurioita. Loppuun käytettävä silta tarkoittaa tässä yhteydessä siltaa, joka tiedetään poistettavaksi käytöstä tietyn ajan kuluessa, joko siksi että liikennenointi loppuu kyseisellä tieosuudella tai tilalle rakennetaan uusi silta. Rakenteen murtumistavan tulee tällöin kuitenkin olla sitkeä. Jotta mahdolliset viitteet rakenteen vaurioitumisesta havaitaan, on silta otettava tehostettuun tarkkailuun alennettuja osavarmuuslukuja käytettäessä (Liikenneviraston ohjeita 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje). Kuvassa 8. on esitetty siltojen murtorajatilassa kuormien mitoitusarvot.

Kuorma			Tunnus	Murtorajatilan mitoitusarvo
Kaikki sillat	Esijännitys (E <sub>d,p</sub> )		P	$\gamma_P \cdot \Psi_{0,ULS,P} \cdot P$
	Pysyvät kuormat (E <sub>d,G</sub> )	Oma paino	G	$\gamma_G \cdot \Psi_{0,ULS,G} \cdot G$
		Maan lepopaine	MLEP	$\gamma_G \cdot \Psi_{0,ULS,MLEP} \cdot MLEP$
		Kutistuma	KUT	$\gamma_G \cdot \Psi_{0,ULS,KUT} \cdot KUT$
		Tukipainuma	S	$\gamma_G \cdot \Psi_{0,ULS,S} \cdot S$
	Muuttuvat kuormat (E <sub>d,Qk</sub> )	Pintalämpötilaero	T <sub>dk</sub>	$\gamma_{Tdk} \cdot \Psi_{0,ULS,Tdk} \cdot T_{dk}$
		Lämpötilan muutos	T <sub>ck</sub>	$\gamma_{Tck} \cdot \Psi_{0,ULS,Tck} \cdot T_{ck}$
Laakerikitka		BF	$\gamma_{BF} \cdot \Psi_{0,ULS,BF} \cdot BF$	
Tie- ja katu- sillat	Liikenne- kuorma- kaaviot (E <sub>d,Lk</sub> )	AA, EK, EK <sub>valv</sub> , p	Q <sub>k,i</sub>	$\gamma_{Qk,i} \cdot \Psi_{0,ULS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskipakokuorma	Q <sub>tk</sub>	$\gamma_{Qtk} \cdot \Psi_{0,ULS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Jarrukuorma / sivusysäys	Q <sub>lk</sub>	$\gamma_{Qlk} \cdot \Psi_{0,ULS,Qlk} \cdot Q_{lk}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\gamma_{TLEP} \cdot \Psi_{0,ULS,TLEP} \cdot TLEP$
Rauta- tie-sillat	Liikenne- kuormien yksittäiset komponentit (E <sub>d,Lk</sub> )	LM71(SW/o), Kuormittama- ton juna, EN15528:n kaavio, Todellinen juna, Ominais- juna	Q <sub>k,i</sub>	$\gamma_{Qk,i} \cdot \Psi_{0,ULS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskipakokuorma	Q <sub>tk</sub>	$\gamma_{Qtk} \cdot \Psi_{0,ULS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Veto- ja jarrukuormat	Q <sub>br</sub>	$\gamma_{Qbr} \cdot \Psi_{0,ULS,Qbr} \cdot Q_{br}$
		Sivusysäyskuormat	Q <sub>lk</sub>	$\gamma_{Qlk} \cdot \Psi_{0,ULS,Qlk} \cdot Q_{lk}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\gamma_{TLEP} \cdot \Psi_{0,ULS,TLEP} \cdot TLEP$

Kuva 8. murtorajatilassa kuormien mitoitusarvot.



Murtorajatilassa ajoneuvokuormien osavarmuusluvut tie- ja katusilloille on esitetty kuvassa 9. Mukaan myös sallitut alennetut osavarmuusluvut suluissa.

- liikennekuormat, painorajoitustarkastelu
  - yksi AA-kaavio: AA  $\gamma_{Qk,AA} = 1,45 (1,25)$
  - kaksi AA-kaaviota: 2xAA  $\gamma_{Qk,2AA} = 1,30 (1,10)$
  - 1 AA-kaavio + pintakuorma: AA  $\gamma_{Qk,AAp} = 1,30 (1,10)$
  - p  $\gamma_{Qk,p} = 1,60 (1,35)$

Kuva 9. murtorajatilan kuormien osavarmuusluvut.

Varsinaiset yhdistelyt rakenteissa saataville rasituksille saadaan, kun suoritetaan kaikkien kuormien yhdistelyt. Murtorajatilan yhdistelykertoimet tie- ja katusilloille on esitetty kuvissa 10. ja 11. Mikäli näissä yhdistelyissä on kuormia, joita ei käsitellä tulee ne huomioida eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 1 mukaan tai tilaajan kanssa sovittavalla tavalla.

Kuorma		Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,ULS,i}$			
			Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräsiittorakenteiset sillat	Puu-sillat
			TB	JB		
Esijännitys ( $E_{d,p}$ )		P	-	1,0	1,0	1,0
Pysyvät kuormat ( $E_{d,G}$ )	Oma paino	G	1,0	1,0	1,0	1,0
	Maan lepopaine <sup>1)</sup>	MLEP	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kutistuma	KUT	0	1,0	0,5	-
	Tukipainuma	S	0	0,25	0	0
Muuttuvat kuormat ( $E_{d,Qk}$ )	Pintalämpötilaero <sup>2)</sup>	$T_{dk}$	0	0,5	0,25	-
	Lämpötilan muutos	$T_{ck}$	0	0,5	0,5	-
	Laakerikitka <sup>3)</sup>	BF	0,6	0,6	0,6	0,6

Kuva 10. murtorajatilan pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet.

Kuorma	Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,ULS,i}$			
		Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräsiittorakenteiset sillat	Puu-sillat
		TB	JB		
Kuormakaaviot AA, EK, EK <sub>valv</sub> , p	$Q_{k,i}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen keskipakokuorma	$Q_{tk}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Jarrukuorma / sivusysäys	$Q_{lk}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen maanpaine	TLEP	0,75	0,75	0,75	0,75

Kuva 11. murtorajatilan liikennekuormien yhdistelykertoimet.

## 3.4.3 Käyttörajatila

Kantavuuslaskennassa käyttörajatilassa on vain yksi tarkasteluyhdistely (vrt. uusien siltojen suunnittelussa käyttörajatila jaetaan ominais-, tavallinen- ja pitkäaikais yhdistelyihin). Kuvassa 12. on esitetty kantavuuslaskennassa käytettävät käyttörajatilan mitoitusarvot. Kuvissa 13. ja 14. on esitetty käyttörajatilan yhdistelykertoimet.

Kuorma			Tunnus	Käyttörajatilan mitoitusarvo
Kaikki sillat	Esijännitys ( $E_{k,p}$ )		P	$\psi_{0,SLS,P} \cdot P$
	Pysyvät kuormat ( $E_{k,G}$ )	Oma paino	G	$\psi_{0,SLS,G} \cdot G$
		Maan lepopaine	MLEP	$\psi_{0,SLS,MLEP} \cdot MLEP$
		Kutistuma	KUT	$\psi_{0,SLS,KUT} \cdot KUT$
		Tukipainuma	S	$\psi_{0,SLS,S} \cdot S$
	Muuttuvat kuormat ( $E_{k,Qk}$ )	Pintalämpötilaero	$T_{dk}$	$\psi_{0,SLS,Tdk} \cdot T_{dk}$
		Lämpötilan muutos	$T_{ck}$	$\psi_{0,SLS,Tck} \cdot T_{ck}$
		Laakerikitka	BF	$\psi_{0,SLS,BF} \cdot BF$
Tie- ja katusillat	Liikennekuorma-kaaviot ( $E_{k,Lk}$ )	AA, EK, EK <sub>valv</sub> , p	$Q_{k,i}$	$\psi_{0,SLS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskipakokuorma	$Q_{tk}$	$\psi_{0,SLS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Jarrukuorma / sivusysäys	$Q_{lk}$	$\psi_{0,SLS,Qlk} \cdot Q_{lk}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\psi_{0,SLS,TLEP} \cdot TLEP$
Rautatie-sillat	Liikennekuormien yksittäiset komponentit ( $E_{k,Lk}$ )	LM71(SW/o), kuormittamaton juna, EN15528, todellinen juna, ominaisjuna	$Q_{k,i}$	$\psi_{0,SLS,Qk,i} \cdot Q_{k,i}$
		Keskipakokuorma	$Q_{tk}$	$\psi_{0,SLS,Qtk} \cdot Q_{tk}$
		Veto- ja jarrukuormat	$Q_{br}$	$\psi_{0,SLS,Qbr} \cdot Q_{br}$
		Sivusysäyskuormat	$Q_{lk}$	$\psi_{0,SLS,Qlk} \cdot Q_{lk}$
		Liikenteen maanpaine	TLEP	$\psi_{0,SLS,TLEP} \cdot TLEP$

Kuva 12. käyttörajatilan kuormien mitoitusarvot.

Kuorma		Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,SLS,i}$			
			Betonisillat		Terässillat sekä betoni-teräsi-liittorakenteiset sillat	Puu-sillat
			TB	JB		
Esijännitys ( $E_{k,p}$ )		P	-	1,0	1,0	1,0
Pysyvät kuormat ( $E_{k,G}$ )	Oma paino	G	1,0	1,0	1,0	1,0
	Maan lepopaine <sup>1)</sup>	MLEP	1,0	1,0	1,0	1,0
	Kutistuma	KUT	0	1,0	0,5	-
	Tukipainuma	S	0,25	0,4	0,25	0,25
Muuttuvat kuormat ( $E_{k,Qk}$ )	Pintalämpötilaero <sup>2)</sup>	$T_{dk}$	0,25	1,0	0,25	-
	Lämpötilan muutos	$T_{ck}$	0,25	0,75	0,5	-
	Laakerikitka <sup>3)</sup>	BF	0,6	0,6	0,6	0,6

Kuva 13. käyttörajatilan pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet.

Kuorma	Tunnus	Yhdistelykerroin $\psi_{0,SLS,i}$			
		Betonisillat		Terässillat ja betoni-teräs- liittorakenteiset sillat	Puu- sillat
		TB	JB		
Kuormakaaviot AA, EK, EK <sub>valv</sub> , p	$Q_{k,i}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen keski- pakokuorma	$Q_{tk}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Jarrukuorma / sivusysäys	$Q_{lk}$	1,0	1,0	1,0	1,0
Liikenteen maan- paine	TLEP	0,75	0,75	0,75	0,75

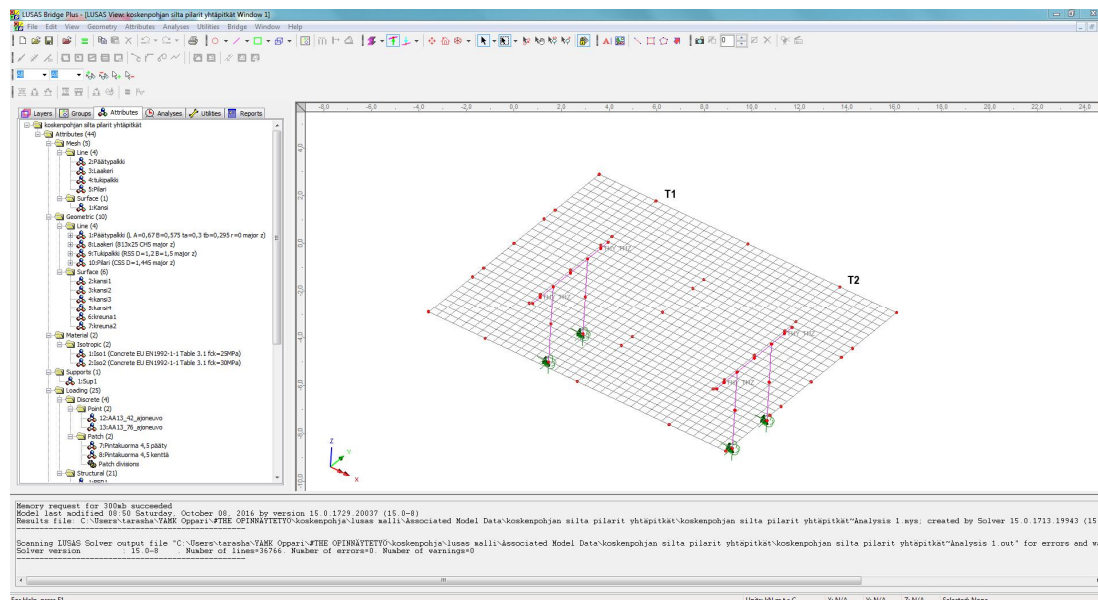
Kuva 14. käyttörajatilan liikennekuormien yhdistelykertoimet.

### 3.5 Muut rakenteelliset asiat

Tarkasteltaessa siltarakenteita materiaalista riippumatta tulee rakenteelle tutkia rakenneosan taipuma. Taipumat eivät saa haitata sillan toimintaa tai vaarantaa sen käyttäjien turvallisuutta. Sen jälkeen tutkittavat tapaukset alkavat mennä materiaaliikohtaisiksi. Minkälaiselle materiaalille tulisi tutkia mitäkin ja millä menetelmällä riippuu kohteesta. Kantavuuslaskentaohje käsittelee laajimmiten betoni silta asioita. Betonirakenteesta tulisi tehdä ainakin taivutus-, leikkaus-, lävistys-, vääntö- ja halkeilutarkastelut.

### 3.6 Mallinnusohjelmat

Opinnäytetyössä on käytetty FEM-pohjaista Lusas -laskentaohjelmistoa ja tarkemmin sanottuna sen Bridge plus versiota. Ohjelmisto soveltuu siltojen suunnitteluun ja kantavuuslaskennan tekoon hyvin. Lusas mahdollistaa silloille ominaisten ajoneuvokuormien lisäämisen rakennemalliin ja mahdollistaa kuorman "ajattamisen" rakenteen yli ja määräävien rasitusten saamisen irti rakenteen halutuilta kohdilta. Lusas myös mahdollistaa myös silloille ominaisten lämpötilakuormien asettamisen rakenteelle. Kuvassa 15. on esitetty Lusas-ohjelmiston yleisnäkymä.



Kuva 15. Lusas-ohjelmiston yleisnäkymä.

Kuva on otettu Case 1 laattasillan rakennemallista. Kuvassa vasemmalla sijaitsevaan osioon voidaan syöttää rakenteen tiedot, materiaaliominaisuudet, rakennepaksuudet, rakenteen elementtiverkon koko, tuet, kuormat ja niiden yhdistelyt sekä rakenteen rasitukset. Oikealla olevassa osiossa voidaan muodostaa varsinainen rakennemalli.

## 4 KANTAVUUSLASKENTA KOHTEET

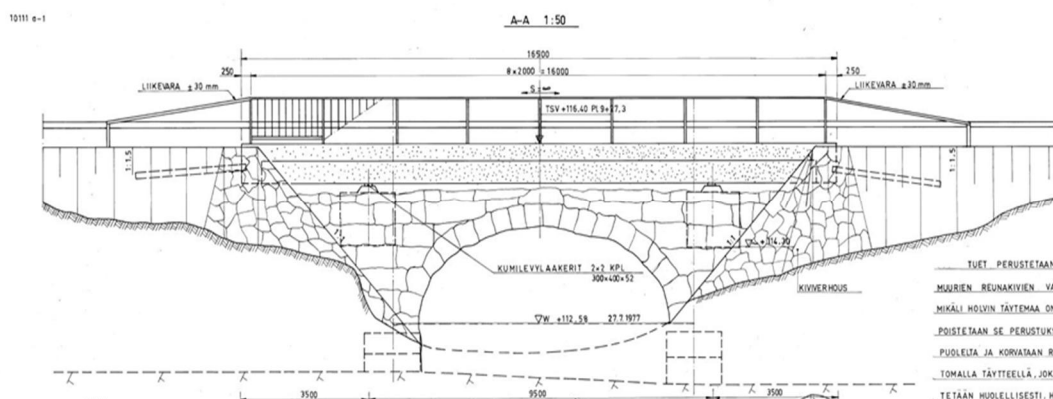
Tarkasteltaviksi opinnäytetyöhön on valikoitunut kaksi betonista olemassa olevaa siltakohdetta. Ensimmäinen tapaus on betoninen laattasilta. Kohteeseen suoritettu kantavuustarkastelu on tehty syksyllä 2015. Tällöin kantavuuslaskentaohjeesta saatavilla on ollut vain Liikenneviraston julkaisema kommenttiversio. Varsinainen versio on astunut voimaan 2016 vuoden alussa. Mahdolliset muutokset ohjeistuksien sisällöissä on jätetty huomioimatta opinnäytetyötä tehdessä.

Toinen tarkasteltava kohde on betoninen kotelopalkkisilta. Tästä sillasta yritetään muodostaa mahdollisimman hyvin todellisuutta kuvaava rakennemalli, josta rasitukset voidaan luotettavasti saada. Kehittämistyötä lähdetään tekemään voimassa olevan kantavuuslaskenohjeen ehdoilla.

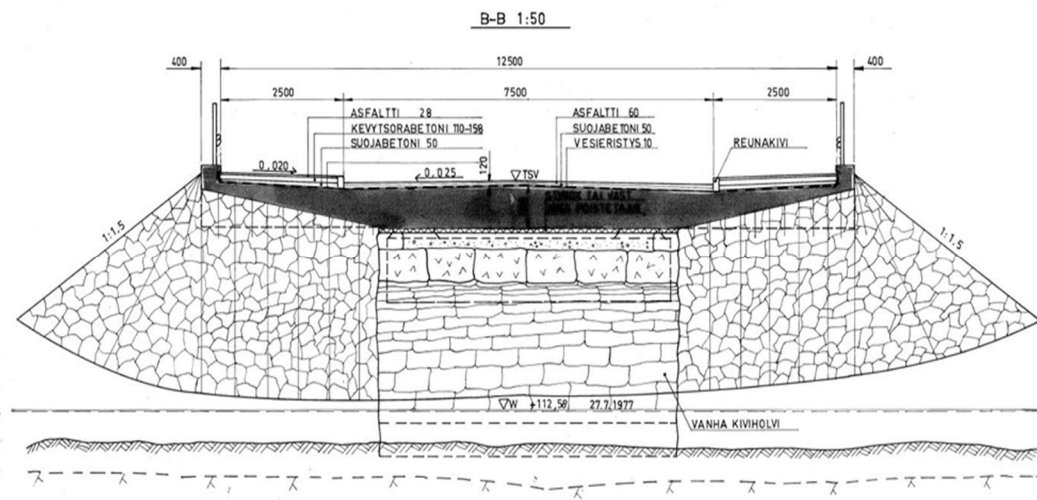
### 4.1 CASE 1, Betoninen laattasilta

#### 4.1.1 Lähtötiedot

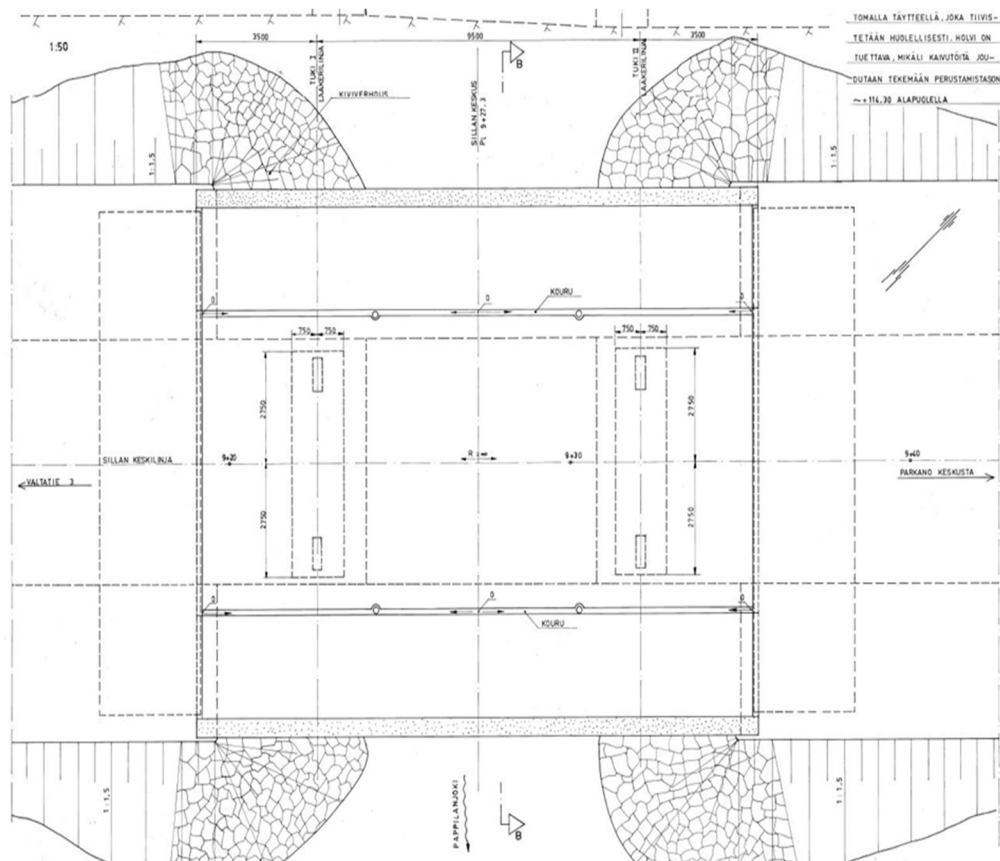
Tarkasteltava kohde on 1-aukkoinen teräsbetoninen ulokelaattasilta, jonka jännemitat ovat 3,5m + 9,5m + 3,5m ja hyödyllinen leveys 12,5m. Sillalla on 2,5m leveät reunakivellä korotetut jalkakäytävät molemmilla reunoilla. Silta on valmistunut vuonna 1981. Sillan alla on vuonna 1928 rakennettu kiven holvisilta, jonka taustojen läpi laattasilta on kahden  $D = n. 1,5$  m betonipilarin avulla perustettu kalliolle ja ankkuroitu kallioon T25 teräksillä. Silta on suoralla tien kohdalla. Sillan suunnittelussa alun perin on suunnittelukuormina käytetty PKM 71, EK 1 kuormitusta. Sillan molemmin puolin sijaitsee 3 m pitkä siirtymälaatta. Siltakannen toisella reunalla on olemassa oleva kaukolämpöputki. Siltakohteen kuvat 16-20.



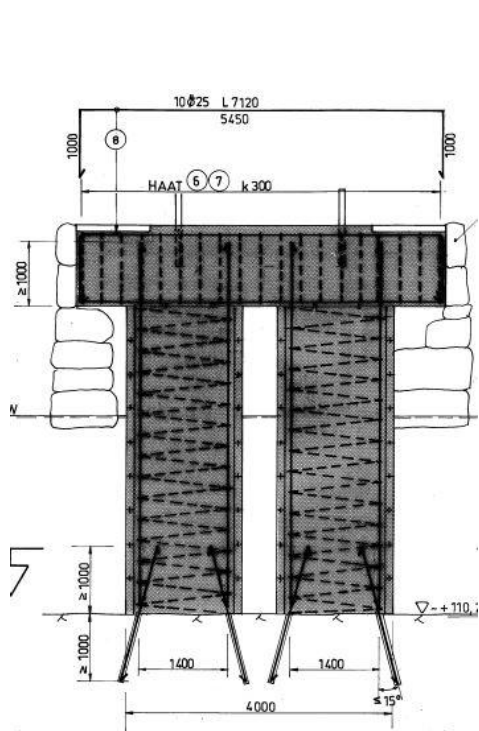
Kuva 16. Sillan pituusleikkaus



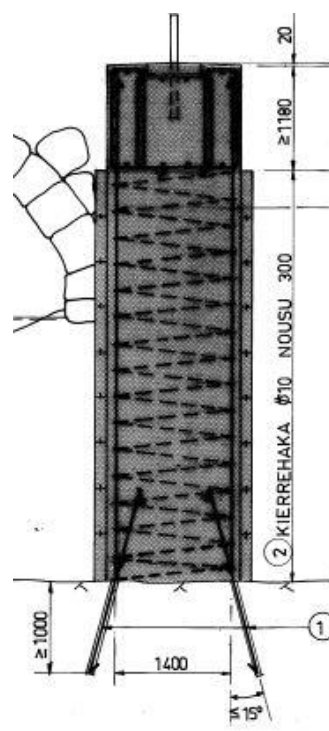
Kuva 17. Sillan poikkileikkaus



Kuva 18. Sillan tasokuva



Kuva 19. Sillan alusrakenteet poikkisuunta



Kuva 20. Sillan alusrakenteet pituusuunta

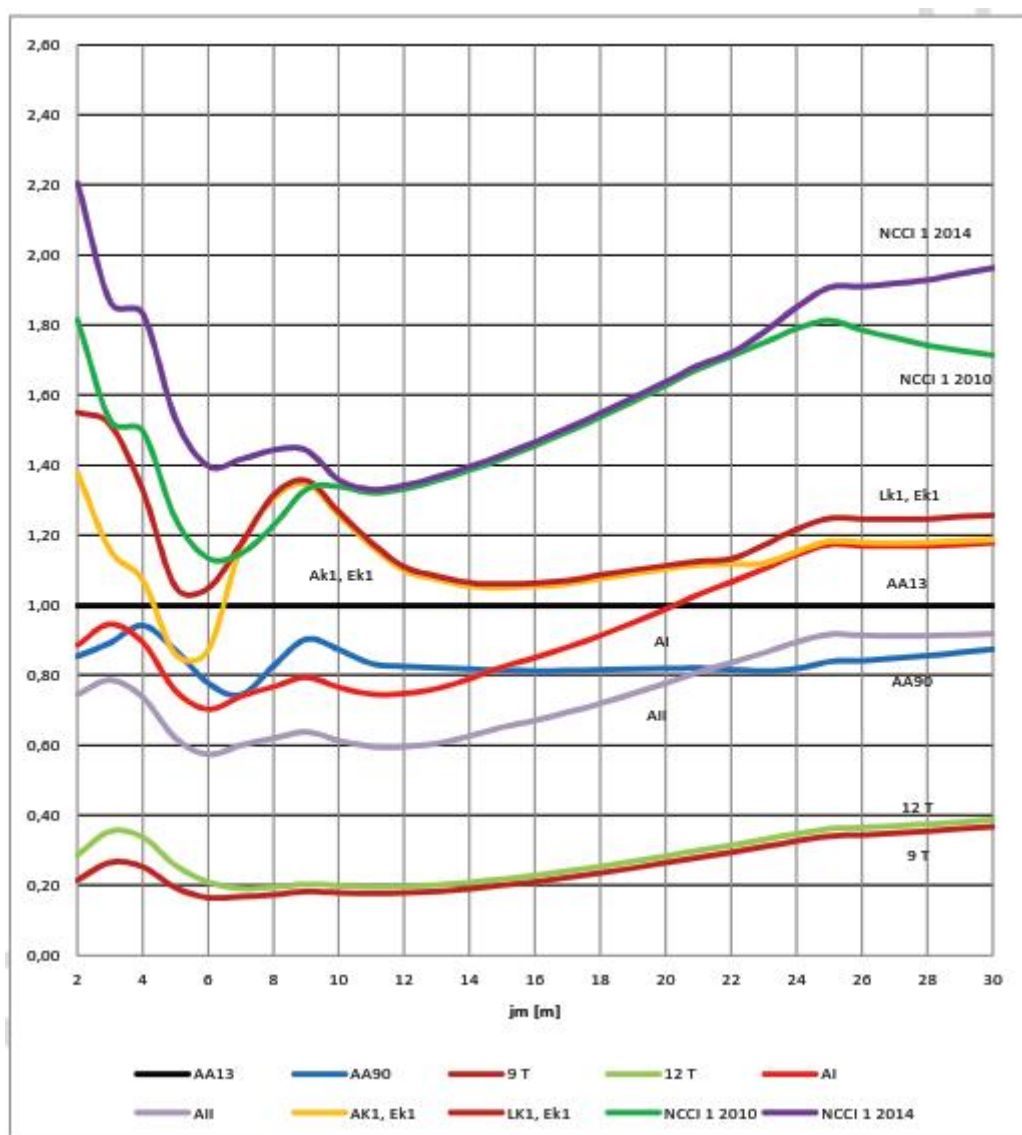
Sillan alusrakenteet on piilotettu vanhan kivisen holvisillan sisään. Vanha holvisilta ei ole miltään osin kantava vaan ainoastaan esteettisyyden takia jätetty paikoilleen. Sillalle on laadittu tarkastusraportti 25.4.2015 ulkopuolisen konsultin toimesta. Muuten siltapaikalla ei ole käyty tai mahdollisia kuntotutkimuksia ei ole tehty. Ulkopuolisen tarkastusraportin mukaan valmistumisen jälkeen sillalle ei ole tehty merkittäviä korjauksia.

Kohteesta on pyritty luomaan mahdollisimman kokonaisvaltainen kantavuustarkastelu ja määrittelemään onko kohteelle asetettava painorajoituksia.

#### 4.1.2 Kantavuuslaskennan lähtökohdat

Laskennassa on käytetty Liikenneviraston Kantavuuslaskentaohjetta 20.4.2015 (kommenttiversio). Sillan kantavuutta on lähdetty tutkimaan kannen osalta karkealla käsinlaskennalla ja kantavuuslaskentaohjeen kommenttiversiön Liitteen 7 mukaisilla taulukoilla eri aikakausien suunnittelukuormien ja vuoden 2013 ajoneuvoasetuskuorman taivutusmomenttien suhteista, esimerkki tästä kuvassa 21. Tästä on päädytty tulkintaan, jonka mukaan sillalla on hyvät mahdollisuudet kestää AA13 ajoneuvoasetuksen mukaiset kuormat ja lähdetty tutkimaan siltaa AA13 mukaisille ajoneuvokuormille. Kohteessa ei ole suoritettu lähempää tarkastelua sillan osien varsinaisen kunnan suhteen eikä kohteelle ole suoritettu tarkemmittausta. Sillan mitat ja muut tiedot on otettu sillan vanhoista suunnitelmista. Kohteen perustukset on oletettu painumattomiksi, koska ne sijaitsevat kalliolla. Sillan geoteknisiä kantavuustarkasteluja ei tästä syystä ole tehty.



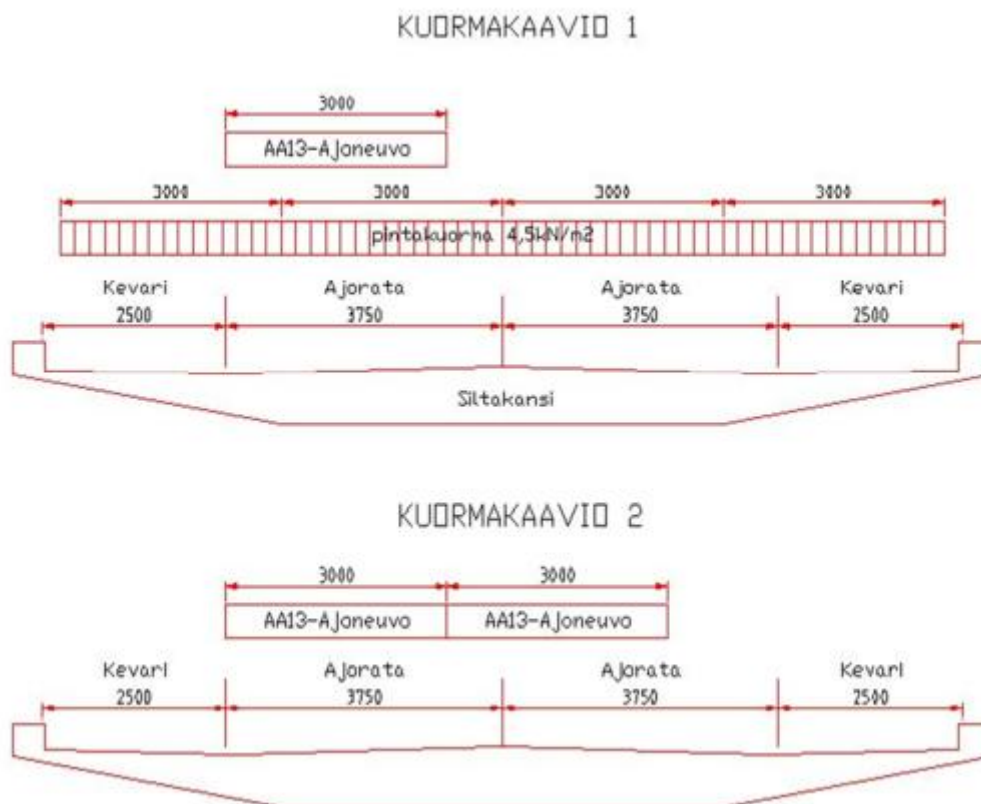


Kuva 21. Kuormien ominaisarvoilla laskettujen tukimomenttien suhteet eri jännemitoilla.

Siltakannelle on muodostettu kaksi erillistä kuormitustapausta. Siltakansi on jaettu neljään 3 m leveään ajokaistaan, joille kuormia on sijoitettu kantavuuslaskentaohjeen kommenttiversion mukaisesti. Ensimmäisessä kuormitustapauksessa kaistoilla on 4,5kN/m<sup>2</sup> tasaiset kuormat ja yksi AA13-ajoneuvo. Toisessa kuormitustapauksessa kannella on kaksi AA13 ajoneuvoa.

Kuormitustapaukset on esitetty kuvassa 22. AA13 ajoneuvot on sijoitettu mahdollisimman epäedullisesti siltakannelle eli kevyenliikenteen reunakiveyksen viereen, sille puolelle siltakantta, jossa siltakanteen on kiinnitetty kaukolämpöputki. Näistä kuormakaavioista on myös muodostettu tarkasteltavat kuormitukset alusrakenteille.



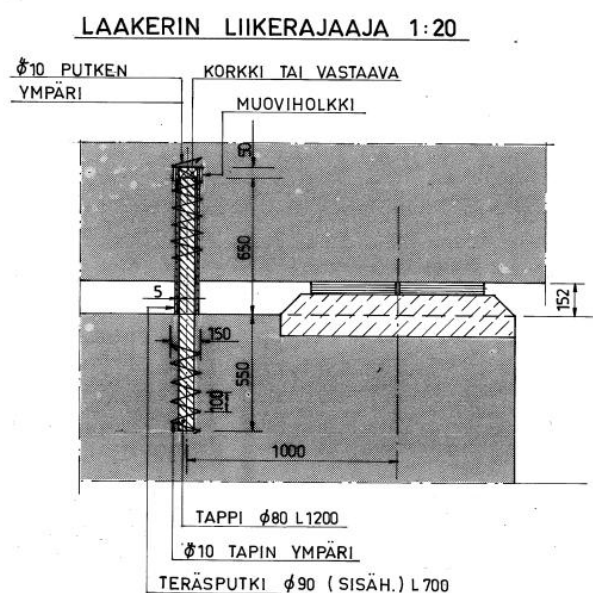


Kuva 22. siltakannella eri aikaan vaikuttavat kuormakaaviot.

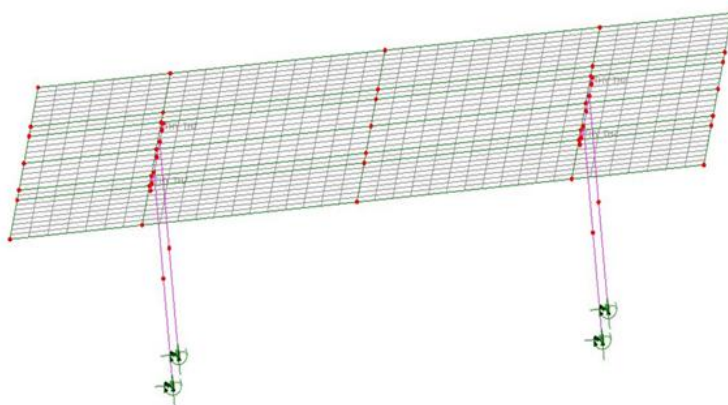
#### 4.1.3 Rakennearaalyysi

Laskennassa on päädytty käyttämään kantavuuslaskentaohjeen tarkastelun laajuutta 2, jolloin voimasuureet lasketaan tarkalla rakennemallilla. Kuormat on yhdistelty murto – ja käyttörajatilassa Siltojen kantavuuslaskentaohjeen (xx/2015), kommenttiversio 20.4.2015 mukaisesti (taulukot 1 ja 2). Ajoneuvokuormiin on myös lisätty dynaamiset sysäyslisät. Rakenteen materiaalit on huomioitu kantavuuslaskentaohjeen mukaisesti ja ne esitetty kuvassa 25. Alkuperäisistä suunnitelmista poiketen betonin kuutiolujuutta on kasvatettu 5 MPa kantavuuslaskentaohjeen sallimalla tavalla. Kuvissa 24-25 on esitetty laskennassa käytetyt rakennemalli ja materiaaliominaisuudet. Rakennemallissa pilarit on tuettu momenttijäykästi, koska ne on ankkuroitu kallioon. Pilarit on valettu kaivonrenkaiden sisään. laskelmia tehdessä näitä kaivonrenkaita ei ole huomioitu vaan pilareiden halkaisijan on oletettu olevan kaivonrenkaan sisähalkaisija. Pilareiden päälle on asetettu olemassa olevien suunnitelmien mukainen tukipalkki, joka on jäykästi ankkuroitu pilareihin. Tukipalkille on sijoitettu laakerina toimivat teräspoikkileikkaukaskappaleet, jotka eivät ota vastaan momenttia. Näin rakennemallissa sillankansi on saatu mallinnettua laakeiden varaan. Sillankansi on tuettu vaakasuuntaisesti neljällä 80mm halkaisilla olevalla terästäpilla, jotka menevät kanteen laakereiden vierestä. Tapit on valettu jäykiksi tukipalkkeihin mutta kanteen ne menevät 90mm teräspalkkien sisään (kuva 23). Näin ollen kansi voi liikkua ”vapaasti” hieman. Laskennallisesti siltakannen on ajateltu olevan niin painava, etteivät mahdolliset jarru tai muut vaakakuormat pääse liikuttamaan kantta ja mahdolliset pienet siirtymät välittyvät kannen kautta penkoille.

Terästappien kunnosta ei myöskään ole tutkittua tietoa. Näin ollen niiden kykyä vastaanottaa vaakuormia ei ole lähdetty arvioimaan. Rakennemallin kansi on mallinnettu thick shell elementteinä (kuva 24). Pilarit, pääty- ja tukipalkit on tehty thick beam-elementteinä. Elementtiverkko eli mesh-verkko on laitettu 0,5m suuruiseksi sillan kannen paksuimman kohdan ollessa 0,7m. Pääsääntöisesti mesh verkon hyväksyttävänä kokona kokemusperäisesti on pidetty, että verkko olisi tiheämpi kuin kannen paksuus. Liian pienen mesh verkon käyttö johtaa hitaampaan laskentaan sekä suurempiin jopa ylisuuriin tukimomentin arvoihin. Tarkasteltaessa yläpinnan tukimomenttia, voidaan hyödyntää momentin tasausta, joka tasoittaa tällaiset ylisuuret momenttiarvot, jotka johtuvat elementtiverkko menetelmästä. NCCI-2 ohjeistus määrittää millainen mesh verkon ja muiden ehtojen tulisi olla, jotta momentin tasausta saisi tehdä. Kohteessa ei ole käytetty momenttien tasausta.



Kuva 23. Kuvassa terästappien detaljipiirustus



Kuva 24. sillasta muodostettu rakennemalli.

Alusrakenteet			Kansi		
Betoniluokka: C28/35 2			Betoniluokka: C32/40 3		
Osavamuusluku	1,35		Osavamuusluku	1,35	
$f_{ck}$	28,0	MPa	$f_{ck}$	32,0	MPa
$f_{cd}$	17,6	MPa	$f_{cd}$	20,1	MPa
$f_{ctm}$	2,60	MPa	$f_{ctm}$	2,90	MPa
$f_{ctd}$	1,33	MPa	$f_{ctd}$	1,48	MPa
$E_{cm}$	31,0	GPa	$E_{cm}$	33,0	GPa

Alusrakenteet			Kansi		
Betoniteräs: A400H, Fe 37b 2			Betoniteräs: A400H, Fe 37b 3		
Osavamuusluku	1,15		Osavamuusluku	1,15	
$f_{yk}$	400	MPa	$f_{yk}$	400	MPa
$f_{yd}$	348	MPa	$f_{yd}$	348	MPa
$E_s$	200	GPa	$E_s$	200	GPa
$f_{yd}/E_s$	1,74	$\frac{0}{100}$	$f_{yd}/E_s$	1,74	$\frac{0}{100}$

Kuva 25. laskennassa käytetyt materiaaliominaisuudet.

#### 4.1.4 Mitoitus

Kohteesta on tehty laskennat kantavuuteen kriittisesti vaikuttavista asioista. Näitä varsinaisia laskelmia ei tässä esitetä vaan ne jäävät salatuksi materiaaliksi opinnäytetyössä, sekä vain työnantajan käyttöön. Laskelmat on tarkastettu työnantajan sisäisen laatuajattelun mukaisesti. Kuvissa 26-28. esitetään sillan osien rakenteiden rasitukset, kestävyys ja käyttöasteet, jotka kohteesta on määritetty.

Rasitukset			
Rakenneosia	Rasitus MRT	Rasitus KRT	Yksikkö
<b>Laatta, määräävä kohta</b>			
Taivutus, alapinta	338	306	kNm
Leikkaus	90	-	kN
Lävistys	-	-	kN
Taipuma	-	6,34	mm
Halkeamaleveys	-	0,285	mm
<b>Laatta, reunauloke</b>			
Taivutus, yläpinta	718,1	561,8	kNm
Leikkaus	557	-	kN
Lävistys	2336	-	kN
Taipuma	-	4,35	mm
Halkeamaleveys	-	0,124	mm
<b>Tukipalkki, määräävä kohta</b>			
Taivutus, yläpinta	577	442	kNm
Leikkaus	1765	-	kN
Halkeamaleveys	-	0,132	mm
<b>Pilari</b>			
Leikkaus	915	-	kN

Kuva 26. Laskennasta saadut rasitukset määrääviltä kohdin siltaa.

Kapasiteetit			
Rakenneosa	Kapasiteetti MRT	Kapasiteetti KRT	Yksikkö
<b>Laatta, määrävä kohta</b>			
Taivutus, alapinta	359	350	kNm
Leikkaus	278	-	kN
Lävistys	-	-	kN
Taipuma	-	15,8	mm
Halkeamaleveys	-	0,35	mm
<b>Laatta, määrävä kohta</b>			
Taivutus, yläpinta	1010	1350	kNm
Leikkaus	683	-	kN
Lävistys	2852	-	kN
Taipuma	-	14,6	mm
Halkeamaleveys	-	0,35	mm
<b>Tukipalkki, määrävä kohta</b>			
Taivutus, yläpinta	1001	920	kNm
Leikkaus	2401	-	kN
Halkeamaleveys	-	0,35	mm
<b>Pilari</b>			
Leikkaus	5540	-	kN

Kuva 27. Laskennasta saadut rakenteen kapasiteetit määräviltä kohdin siltaa.

Rakenneosa	Kapasiteetti MRT	Kapasiteetti KRT
<b>Laatta, kenttä</b>		
Taivutus, alapinta	OK (94,2 %)	OK (87,4 %)
Leikkaus	OK (32,4 %)	-
Lävistys	-	-
Taipuma	-	OK (40,1 %)
Halkeamaleveys	-	OK (81,4 %)
<b>Laatta, määrävä kohta</b>		
Taivutus, yläpinta	OK (71,1 %)	OK (41,6 %)
Leikkaus	OK (81,6 %)	-
Lävistys	OK (81,9 %)	-
Taipuma	-	OK (29,8 %)
Halkeamaleveys	-	OK (35,4 %)
<b>Tukipalkki, määrävä kohta</b>		
Taivutus, yläpinta	OK (57,6 %)	OK (48 %)
Leikkaus	OK (73,5 %)	-
Halkeamaleveys	-	OK (37,7 %)
<b>Pilari</b>		
Leikkaus	OK (16,5 %)	-

Kuva 28. Rakenteen käyttöasteet määräviltä kohdin siltaa.

Siltakohde on tarkasteltu kriittisiltä osiltaan ja se on todettu kantavaksi AA13 ajoneuvokuormille. Sillalle on annettu lupa jäädä yleisen liikenteen käyttöön eikä sille ole määrätty paino- tai muita rajoituksia liikenteen suhteen tässä vaiheessa.

#### 4.1.5 Ylimääräinen tarkastelu

Siltakohteen pilarit on tarkasteltu Tassu ohjelmistolla. Opinnäytetyön teko vaiheessa yritetään tutkia pilareiden riittävää kantavuutta Lusas ohjelmistolla. Aiemmin Lusaksella ei ole tehty tämänkaltaisia tarkasteluja ja opinnäytetyössä pyritään selvittämään Lusaksen mahdollisuuksia pilareiden tarkasteluihin. Tarkastelut suoritetaan laattasillan pilareille soveltuvien osien. Tarvittaessa tapausta sovelletaan, jotta voitaisiin saada käsitys Lusaksen mahdollisuuksista.

Lusaksessa on olemassa wood armer niminen työkalu, jolla raudoitteita voidaan määrittää. Opinnäytetyössä on kuitenkin käynyt ilmi, ettei tämä työkalu sovellu kuin laattojen terästen tarkasteluun. Asiasta on myös kysytty Pertti Ryttylältä Cimeran työntekijä, joka vahvisti wood armer työkalun sopimattomuuden pilareiden raudoitteiden tutkimiseen. Cimeralla on Lusaksen maahantuoja Suomessa. Pertti Ryttylän mukaan Lusaksella on kuitenkin meneillään projekti, jossa pyritään mahdollistamaan myös pilareiden raudoitusten tarkastelu Lusaksessa. Jääkin nähtäväksi, tuleeko Lusakseen joskus ominaisuuksia pilareiden tutkimista varten.

## 4.2 CASE 2, Betoninen kotelopalkkisilta

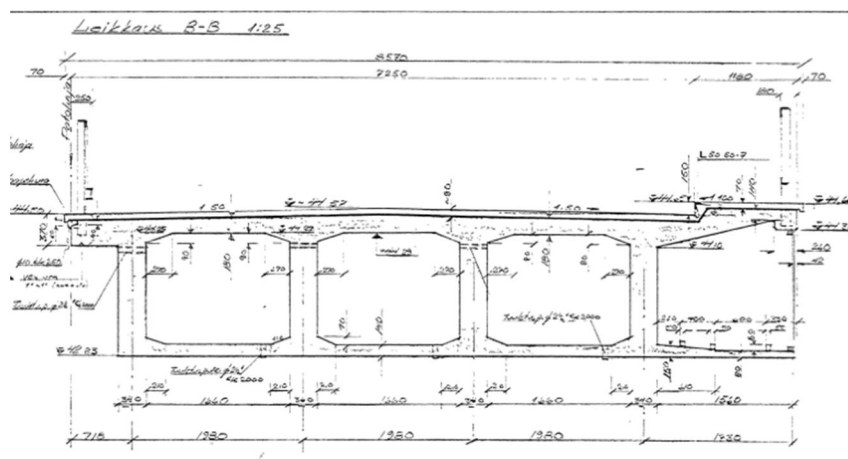
### 4.2.1 Lähtökohta

Opinnäytetyön toiseksi kohteeksi valikoitui betoninen kotelopalkkisilta. Tälle kotelopalkkisillalle ei opinnäytetyössä ole tarkoitus muodostaa kokonaisarviota siltarakenteen kantavuudesta, vaan tutkia kuinka kotelopalkkisillasta voi muodostaa toimivan rakennemallin, josta rakennetta voi tarkastella kantavuuslaskennan näkökulmasta. Kotelopalkkisillalle pyritään muodostamaan toimiva malli, josta voidaan laskea sillan taivutus ja leikkauskestävyydet, sekä tutkia kuinka tällaiseen malliin tulisi sisällyttää lämpötilakuormat, jotta mallista tulisi mahdollisimman totuudenmukainen. Sillasta luotiin useampia erilaisia rakennemalleja ja pohdittiin, mikä näistä malleista olisi järkevä sillan kantokykyä tarkasteltaessa. Samalla pyrittiin syventymään Lusaksen toimintaan ja ymmärtämään ohjelman toimintaa paremmin.

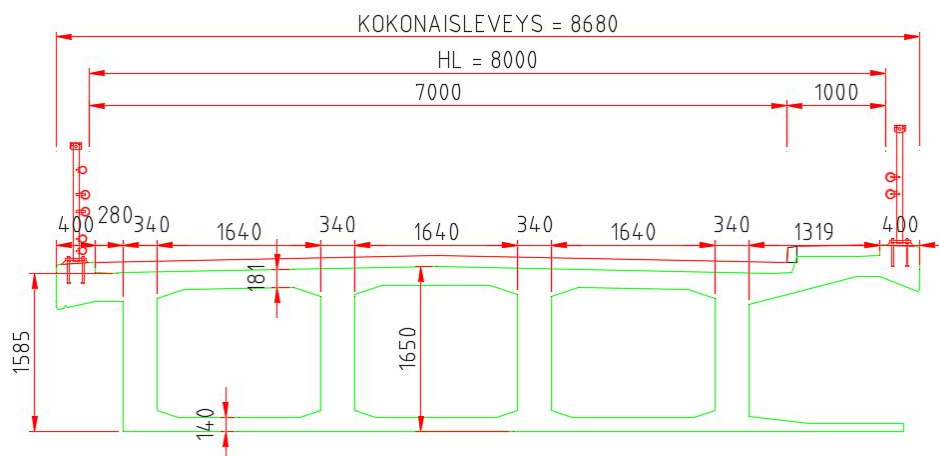
### 4.2.2 Siltarakenne

Seuraavassa on esitelty kotelopalkkirakennetta, jota opinnäytetyössä on tarkasteltu. Silta on kotelopalkkisilta, jossa on neljä pääpalkkia sekä kaksi poikkipalkkia. Silta on alun perin suunniteltu 1962. Sillan jännemitta on 17,1m ja sen hyödyllinen leveys on 8,00m. Kansileveys muodostuu metrin levyisestä kevyenliikenteen kaistasta ja 7,0m ajoneuvoliikenteen alueesta.

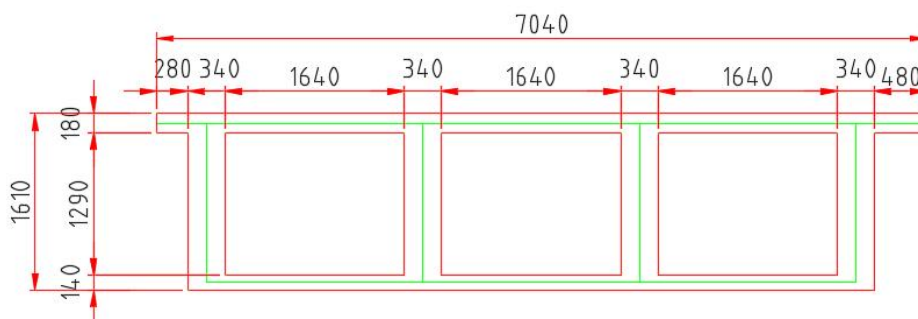
Kuvissa 29-31. esitetään sillan alkuperäinen poikkileikkaus sekä poikkileikkaus, jonka mukaan rakennemallit on muodostettu. Poikkileikkauksesta on muodostettu yksinkertaisempi rakennemalleja luotaessa. Kevyen liikenteen väylän puoleisen siltaulokkeen ei ole ajateltu tuovan lisäkapasiteettia siltarakenteeseen vaan se on jätetty kokonaan pois rakennemallia luotaessa.



Kuva 29. Sillan alkuperäinen poikkileikkaus

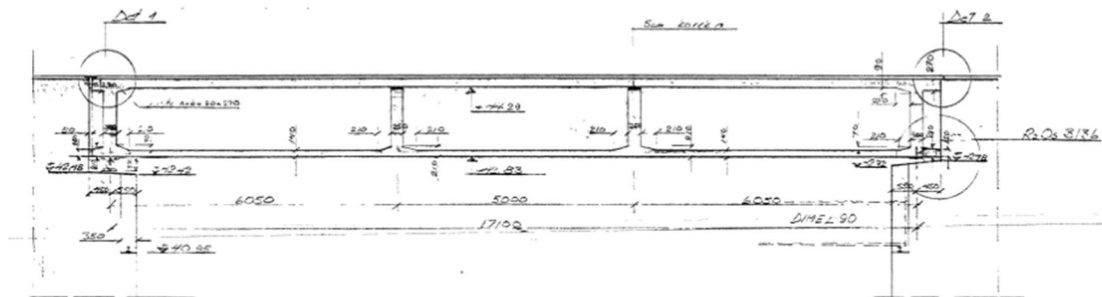


Kuva 30. Sillan alkuperäinen rekonstruoitu poikkileikkaus

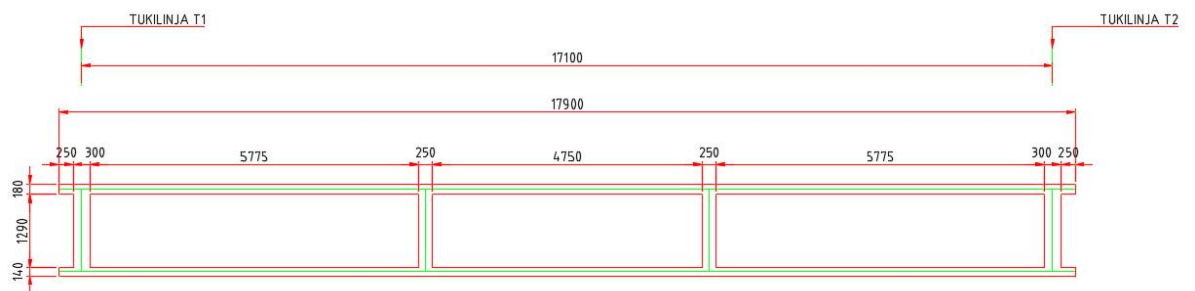


Kuva 31. Sillan rakennemalleissa käytetty pelkistetty poikkileikkaus

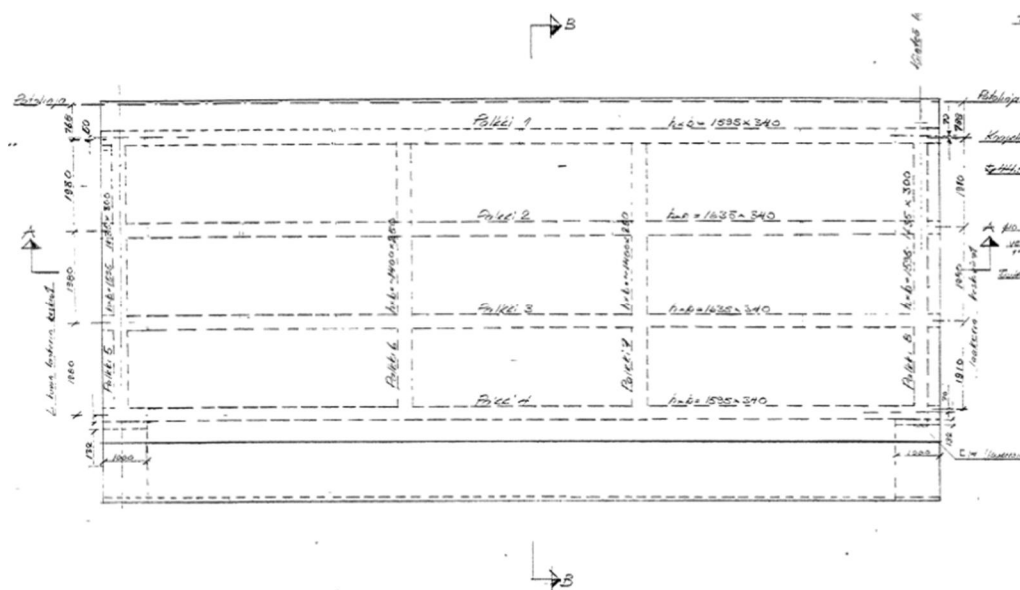
Kuvan 31. mukainen poikkileikkaus on muodostettu rakennemalliin, jossa jokainen sillan osa on muodostettu kuorielementistä (thick shell). Rakennemallissa, jossa on muodostettu laattapalkkimalli, vain ylälaatta on muodostettu kuorielementistä ja poikkileikkauksen palkki osuudet on tehty palkkielementteinä (3D thick beam). Tällaisessa laatta-palkkimallissa alalaattaa ei pysty mallintamaan todenmukaisena. Näin ollen laattapalkkimallissa koko kotelorakenteen vääntöjäykkyys ei vastaa olemassa olevaa rakennetta. Kuvissa 32-36. on esitetty myös rakennemallien teossa käytetyt leikkaukset sekä sillan pituussuunnassa että tasossa. Seuraavissa kappaleissa on näitä erilaisia rakennemalleja käyty läpi yksityiskohtaisemmin.



Kuva 32. Sillan alkuperäinen pituusleikkaus

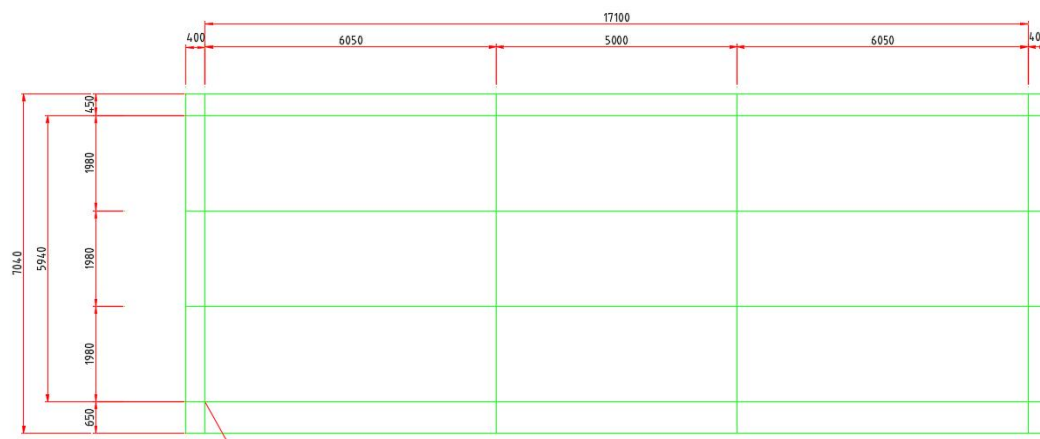


Kuva 33. Sillan rakennemalleissa käytetty pituusleikkaus

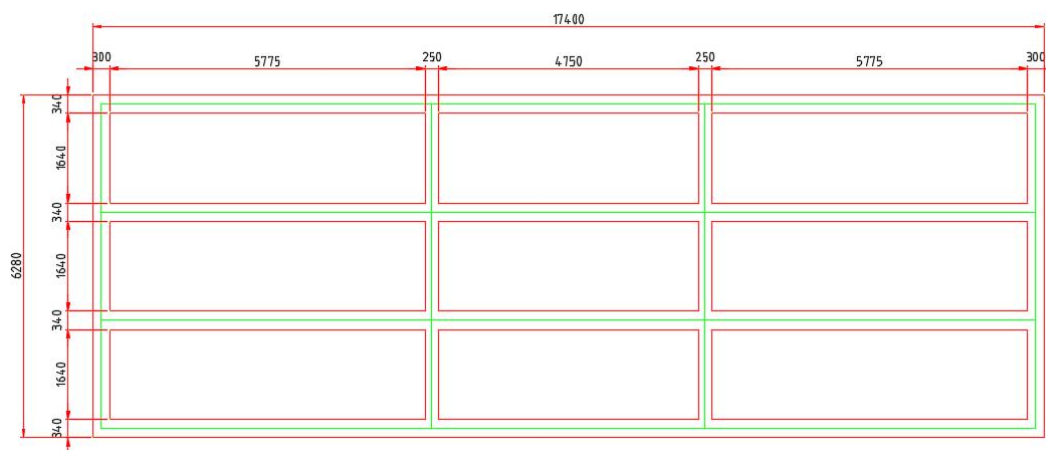


Kuva 34. Sillan alkuperäinen tasokuva





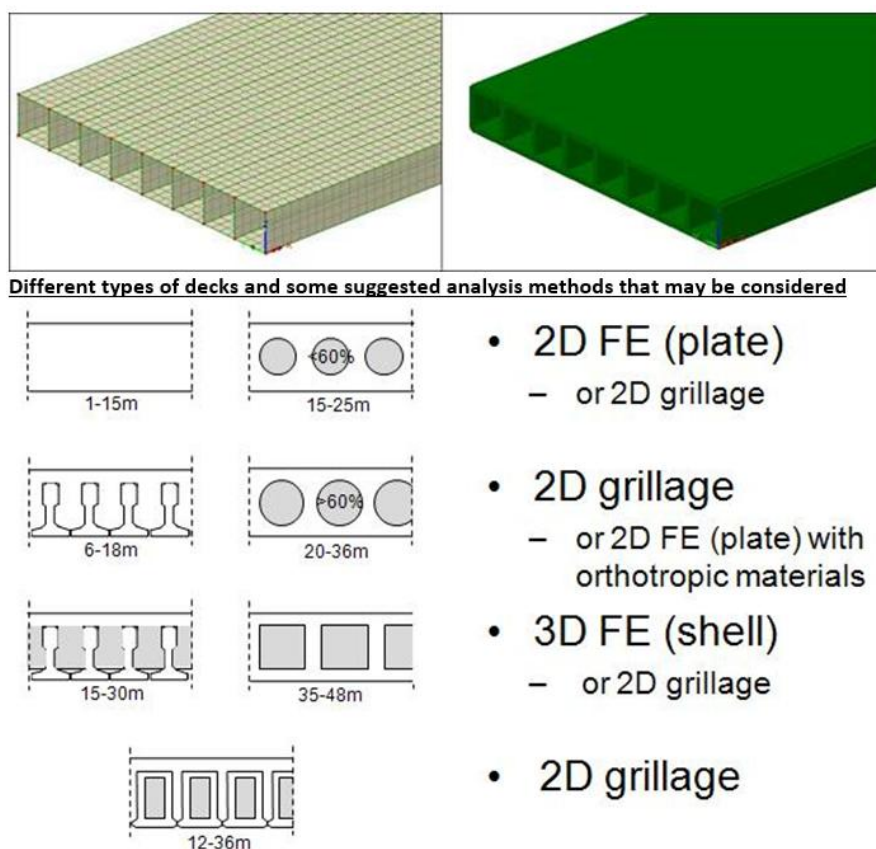
Kuva 35. Sillan rakennemalleissa käytetty tasokuva kannen päältä



Kuva 36. Sillan rakennemalleissa käytetty tasokuva kannen keskiväliltä

#### 4.2.3 Mallin rakentaminen

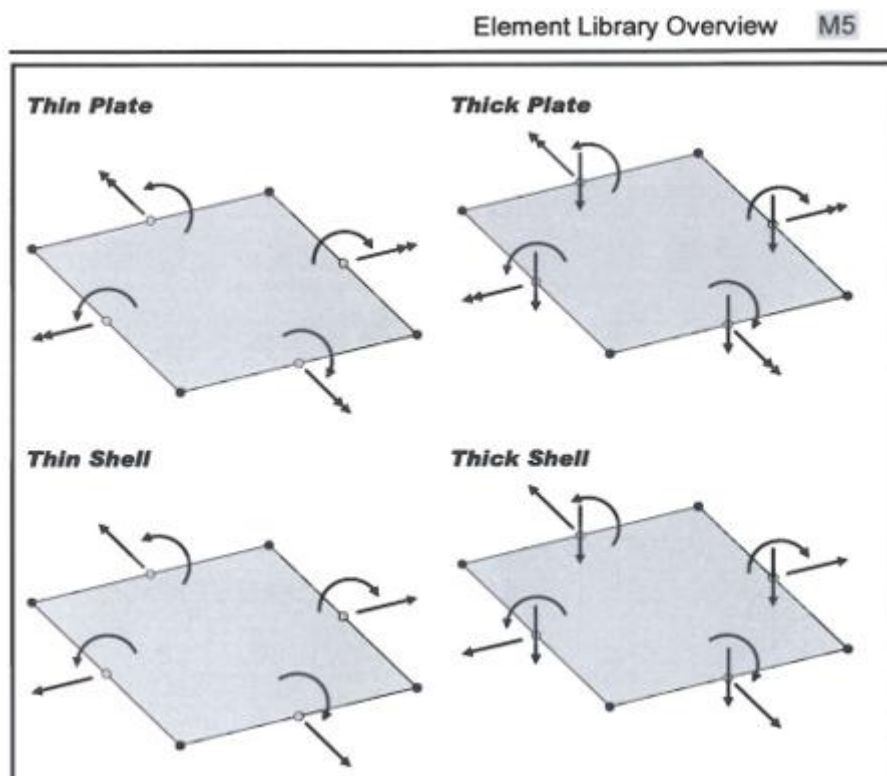
Ennen kuin rakennemalleja alettiin muodostaa, asiasta kysyttiin Lusaksen maahantuojaalta Cimeralta, millaisia rakennemalleja kotelopoikkileikkauksista on mahdollista muodostaa. Vastauksena tähän saatiin alla olevan kuvan 37. mukainen vastaus. Samassa yhteydessä kävi ilmi, että kyseisiä rakennemalleja on käsitelty muun muassa kirjoissa "Bridge Deck Behaviour by E.C.Hambly" ja "Bridge Deck Analysis by Eugene J. O'Brien and Damien L. Keogh". Näiden kirjojen ja alla olevan kuvan mukaisesti kohteesta on rakennemalleja lähdetty muodostamaan ja tutkimaan. Kohteesta on muodostettu kaksi erilaista mallia, jotta voitaisiin tutkia ja havainnollistaa millainen malli soveltuu parhaiten kotelopoikkileikkauksen tutkintaan.



Kuva 37. Mahdollisia tapoja muodostaa kotelosillan rakennemalli

2D plate tarkoittaa laattarakennetta. Lusaksella voi muodostaa myös tällaisia plate -rakenteita. Näitä käytettäessä tulee kuitenkin ymmärtää, millaisia vapausasteita kiertymille, voimille ja momenteille laskentaohjelmisto mahdollistaa. Mikäli näitä ei ymmärrä voi lopputuloksesta muodostua aivan vääränlainen. Lusaksessa plate ja shell komponenttien välillä on eroa. Kuvassa 38. on esitetty komponenteissa vaikuttavia vapausasteita. Kokemuseräisesti aiemmin tehdyissä rakennemalleissa on havaittu thick shell komponentin tuottavan totuudenmukaisia rasituksia laattamalleissa. Tästä syystä molemmissa kotelosillan malleissa on lähdetty käyttämään thick shell kuorielementtejä eikä thick plate elementtiä.

Grillage rakennetta kuvaillaan seuraavasti [www.dictionary.com](http://www.dictionary.com) sivustolla, Grillage: a framework of crossing beams used for spreading heavy loads over large areas. Suomennettuna voitaisiin sanoa, että grillage rakenne muodostuu ristiin menevistä palkeista, joilla jaetaan raskaita kuormia suurelle alueelle. Kuvassa 37. mainitaan grillagen yhteydessä myös ortotrooppinen materiaali. Ortotrooppinen materiaali tarkoittaa materiaalia, jonka lujuusominaisuudet ovat eri suuntiin erilaiset. Esimerkkinä orthotrooppisesta materiaalista voi mainita puun. Ortotrooppisen materiaalin vastakohta on isotrooppinen materiaali. Tällainen materiaali on homogeeninen eli sen rakenne on joka suuntaan samanlainen. Esimerkkinä isotrooppisesta materiaalista voi mainita teräksen.



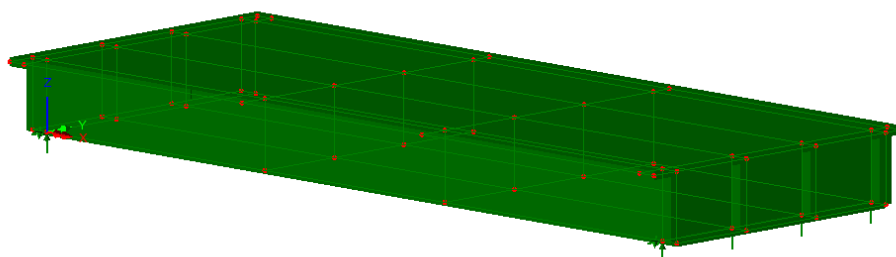
Kuva 38. Kuvassa lusaksen vapausasteita erilaisille komponenteille

#### 4.2.4 Tarkasteltavat mallit

Aluksi käydään läpi lähtökohtia rakennemallien luontia varten. Silta tukeutuu, toisesta päästään rullalaakereille ja toisesta päästään lyijylevyjen päälle. Näistä lähtökohdista sillan rakennemallin tukiehdot on muodostettu. Toisessa päässä malleja on tuki (rullalaakeri). Toisessa päässä malleja on tuki (lyijylevy). Tukiehtoja tutkittiin ensin yksinkertaisella erillisellä palkkimallilla, josta voitiin laskea käsin palkin maksimimomentti ( $pL^2/8$ ) ja todeta että kyseisillä tukiehdoilla laskentaohjelmiston palkkimalli antoi saman suuruisen momentin palkille. Tämän kaltaista yksinkertaisen mallin ja käsinlaskennan yhteyttä on pyritty hakemaan muissakin rakennemallien luontivaiheessa, jotta voitaisiin todeta rakennemallit todenmukaisiksi. Tarkastelut on tehty yksittäisille kuormitustapauksille, jotka ovat mahdollisia varmentaa käsinlaskennalla. Viime vaiheessa, kun rakennemalleista tulee tuloksia ulos on näissä tuloksissa mukana monien eri kuormien aiheuttamat vaikutukset yhdistelykertomineen, joko murto- tai käyttörajatilassa. Näiden yhdistelyjen käsinlaskenta menee jo sen verran hankalaksi, että myöhäisessä vaiheessa niitä on vaikeampaa näyttää todeksi, mikäli rakennemalli ei toimitakaan oikein.

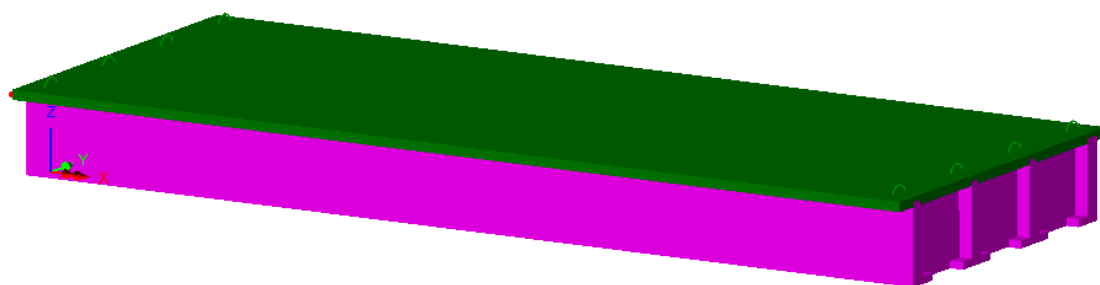
Kun mallien tukiehdot olivat kohdallaan, alettiin kohteesta muodostaa erilaisia rakennemalleja. Tähän työhön varsinaiseen tarkasteluun valittiin kaksi erillistä mallia.

Ensimmäiseksi rakennemalliksi on tehty kuvan 39. mukainen rakenne, johon on mallinnettu kotelopalkin jokainen erillinen laattaosa erikseen kuorielementtinä (thick shell). Tällöin rakenteesta saadaan luotua malli, joka vastaa kokonaisuutena juuri olemassa olevaa rakennetta. Tällaisessa mallissa haasteeksi muodostuu palkkien voimasuureiden esille saanti. Kuorielementtinä mallinnetuista palkkeista ei saa suoraan palkkien omaisesti kappaleen voimasuureita samaan tapaan, kuin laatan voimasuureita Lusas ohjelmistossa. Tästä johtuen kotelopalkkimallia ei ole lähdetty tutkimaan tarkemmin vaan on keskitytty enemmän laattapalkkimalliin.



Kuva 39. Kuvassa kotelopalkkirakennemalli

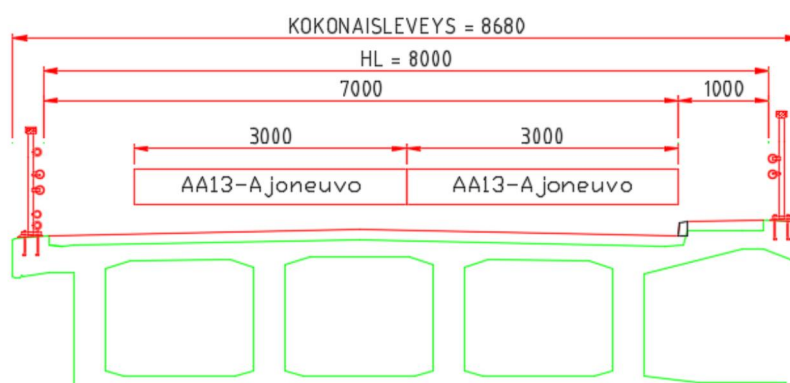
Toiseksi malliksi kohteesta on muodostettu laatta-palkkimalli (kuva 40), jossa ylälaatta on luotu thick shell-kuorielementtinä ja alapuoliset palkit on muodostettu thick beam element-palkkeina. Tässä mallissa on voitu luoda sekä sillan pituus- että poikkisuuntaiset palkit. Alapuolista laattaa ei ole saatu mallinnettua todenmukaisena, joka tällöin heikentää rakennetta. Tällöin muun muassa koko rakenteen vääntöjäykkyys ei vastaa todellista rakennetta. Pituussuuntaisiin palkkielementteihin on luotu hieman alalaippaakin. Todellisessa rakenteessa alalaatassa on reiät, joista koteloihin pääsee sisälle. Nämä reiät eivät kuitenkaan heikennä rakennetta niin paljon kuin rakennemalli, jossa alalaattaa ei ole ollenkaan.



Kuva 40. Kuvassa laattapalkkirakennemalli

Tällaisen laattapalkki-mallin rasituksia pyrittiin tutkimaan ja todentamaan vastaavatko ne todellisuutta. Lähtökohdaksi todenmukaisuus tarkastelua varten otettiin kahden AA13/76 -ajoneuvon murtorajatilan mukainen kuormitus. Kuormituksen akseleihin on lisätty myös sysäyslisät. Kuvassa 41. on selvennetty tätä kuormitustapausta. Kuormitustapauksesta on otettu rasitukset laattapalkkimalleista, joissa toisessa on mukana sillan poikkisuuntaiset palkit ja toisessa ei. Tällä on haluttu tutkia, että sillan poikkisuuntaisesti mallinnetut beam-elementit tuovat jäykkyyttä kokonaisrakenteeseen. Kuvissa 42. ja 43. on näytetty rasitukset kyseisille tapauksille. Kuvista voidaan huomata, että mallissa, jossa poikkipalkit ovat mukana suurin momentti rasitus sillan pituussuuntaisissa palkeissa on 622,3 kNm ja mallissa, joissa poikkipalkkeja ei ole suurin momentti rasitus on 657, kNm. Näin ollen mallinnetut sillan poikkisuuntaiset palkit tuovat kokonaisrakenteeseen lisäjäykkyyttä. Voidaan siis todeta, että rakennemalli käyttäytyy enemmän todellisen rakenteen mukaisesti.

## KUORMAKAAVIO 2

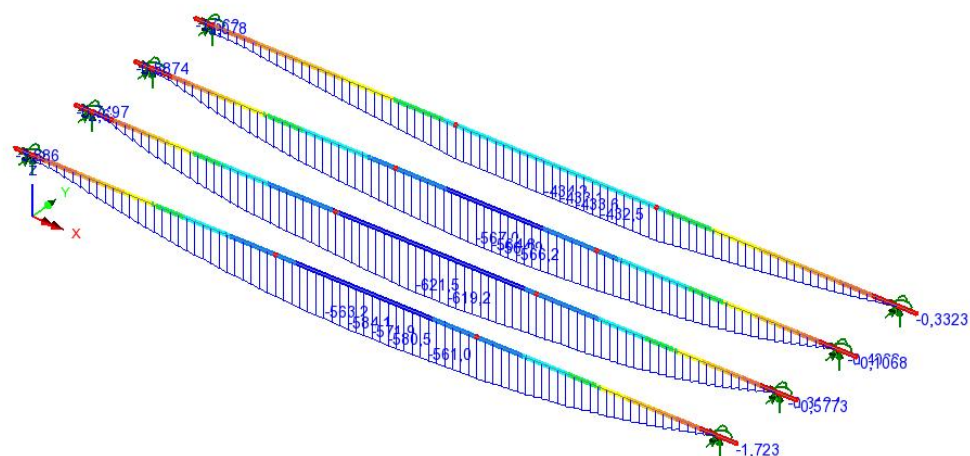


Kuva 41.

Combining on: My  
 Kuormakaavio 2 MRT, AA13 molemmat kaistat (Min)  
 Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
 Component: My (Units: kN.m)

-622,325
-553,178
-484,031
-414,884
-345,736
-276,589
-207,442
-138,295
-69,1473

Maximum -0,0758986 at Gauss point 11 of element 355  
 Minimum -622,401 at Gauss point 11 of element 1327

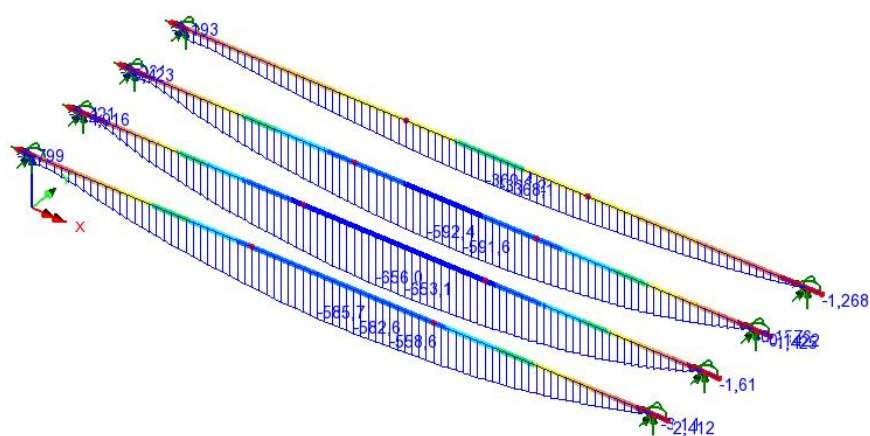


kuva 42. Sillan pituussuuntaisten palkkien rasitukset 2xAA13/76 kuormitukselle. Mallissa mukana poikkipalkit

Combining on: My  
 Kuormakaavio 2 MRT, AA13 molemmat kaistat (Min)  
 Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
 Component: My (Units: kN.m)

-657,587
-584,521
-511,456
-438,391
-365,326
-292,261
-219,196
-146,13
-73,0652

Maximum -0,0339172 at Gauss point 1 of element 1335  
 Minimum -657,621 at Gauss point 11 of element 1287



kuva 43. Sillan pituussuuntaisten palkkien rasitukset 2xAA13/76 kuormitukselle. Mallissa ei ole poikkipalkkeja.

Seuraavaksi tapauksesta on muodostettu laskentamalli pupax-ohjelmistolla, yhdelle sillan pituussuuntaiselle palkille. Pupax laskentamallia varten on muodostettu yhden AA13/76 -ajoneuvon akselis-tosta sellainen, joka voidaan syöttää pupax-malliin. Yksi AA13/76 -ajoneuvo on 19,3m pitkä. Tarkas-teltavan rakenteen jännemitta on vain 17,1 m. Niinpä AA13/76 -ajoneuvosta on otettu määräävä osa akseleita tulevaksi pupax-malliin (kuva 44.). Jäljelle jääneet akselit on kerrottu murtorajatilakertoi-mella ja sysäyslisällä. Kokonaisuudessaan kahden AA13/76 siltakannelle mahtuvat akselit on laskettu yhteen ja jaettu 2xAA13 leveydelle (6m) (katso kuva 41) lisäksi tämä kuorma on jaettu tasaiseksi koko ajoradan leveydelle 7,0m. Nämä "akselit" on kerrottu murtorajatila ja sysäyskertoimilla. Tällöin on oletettu, että palkeille muodostuu 4/7 osaa ja ylälaatalle 3/7 osaa ajoneuvojen akselikuormista. Alla laskenta AA13/76 -ajoneuvon eri akseleista.

AA13/76 ajoneuvossa on neljää eri suuruista akselia 100kN, 90kN, 80kN, 70kN.

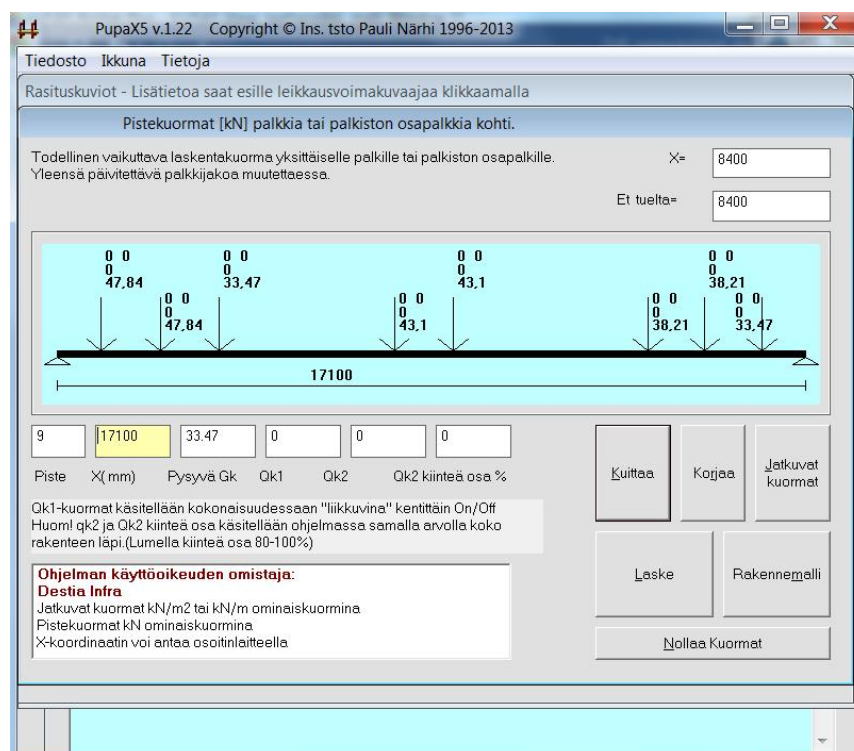
Akselit:

$$100 \times 2\text{kpl} = 200\text{kN}; (200\text{kN}/6\text{m})/(6\text{m}/7\text{m}) = 28,3; 28,57 \times 1,35 \times 1,249 = 47,84 \text{ kN}$$

$$90 \times 2\text{kpl} = 180\text{kN}; (180\text{kN}/6\text{m})/(6\text{m}/7\text{m}) = 25,5; 25,5 \times 1,35 \times 1,249 = 43,1 \text{ kN}$$

$$80 \times 2\text{kpl} = 160\text{kN}; (160\text{kN}/6\text{m})/(6\text{m}/7\text{m}) = 26,6; 33,3 \times 1,35 \times 1,249 = 38,21 \text{ kN}$$

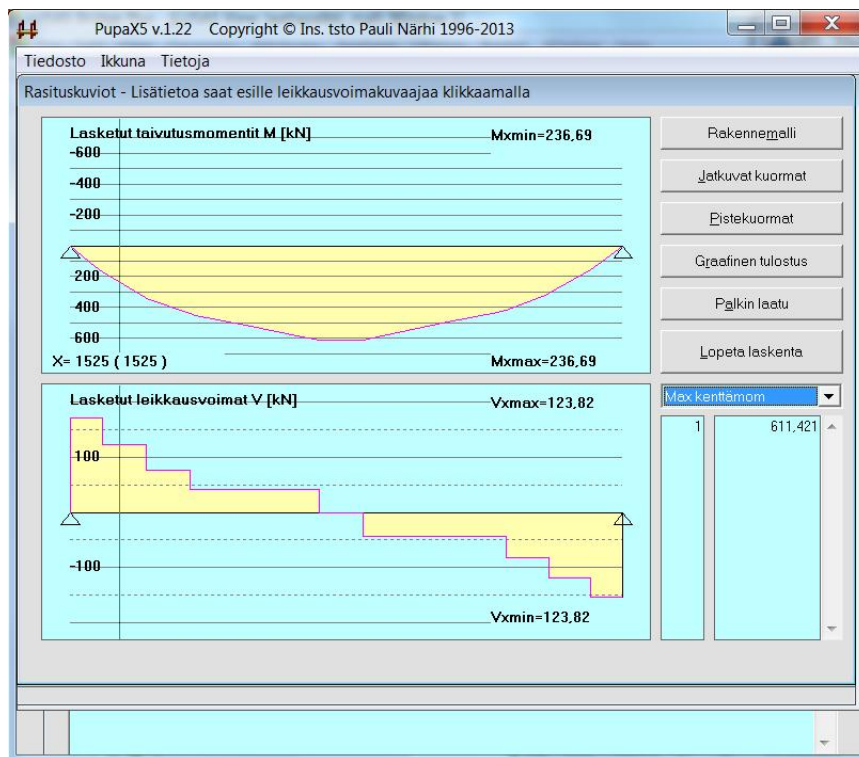
$$70 \times 2\text{kpl} = 140\text{kN}; (140\text{kN}/6\text{m})/(6\text{m}/7\text{m}) = 23,3; 33,3 \times 1,35 \times 1,249 = 33,47 \text{ kN}$$



Kuva 44. Kuvassa yhdelle palkille tulevat akselipistekuormat pupaxissa



Kuvasta 45. voidaan todeta, että maksimimomentti kuvan 44. mukaiselle kuormitustapaukselle on 611,4 kNm. Laattapalkki-malli antaa maksimimomentiksi rakenteelle, jossa ei ole poikkipalkkeja 657,5kNm. Tämä on hyvä suhde, sillä yllä ajatellun akseleiden jakotavan mukaan, jokaiselle siltarakenteen palkille muodostuisi 611,4kNm momentti. Lusas mallista tuotetusta mallista maksimimomentti taas on 657,5kNm, mutta tämä sijoittuu vain yhdelle palkille ja muut palkit saavat hieman pienempiä taivutusmomentti arvoja. Tämä on ymmärrettävää, koska rakennemalliin kaksi AA13/76-ajoneuvoa on aseteltu siten, että kuorma on mahdollisimman epäedullisesti ja näin ollen kuorma keskittyy enemmän sillan toiselle puolelle, eikä jakaudu tasaisesti koko sillan matkalle. Lusas mallin maksimimomentti (657,5kNm) on siis suurempi kuin yksittäinen tasaisesti jakautuneen kuorman momentti 611,4 kNm. Voidaankin todeta, että Lusas laattapalkkimalli antaa luotettavan suuruisia rasituksia, jotka syntyvät staattisista kuormista.



Kuva 45. Kuvassa yhdelle palkille tuleva maksimimomentti akselikuormista.



#### 4.2.5 Mallien sisältö

Molempiin siltamalleihin on tehty kuvan 46. mukaiset kuormitukset ja niiden yhdistelyt. Kuvassa näkyy yksittäisistä kuormituksista muodostetut smart combination ja envelope yhdistelyt. Smart combination yhdistelyjä ovat sinisellä + merkillä varustetut yhdistelyt ja envelope ja ovat haalean keltaisella + merkillä varustetut yhdistelyt. Lusas muodostaa yhdistelystä sekä (max) että (min) yhdistelyt. Tuloksia otettaessa näissä on eroa. Min yhdistelyt esimerkiksi antavat määräävät rasitusmomentit laatan alapinnalle ja Max yhdistelyt laatan yläpinnalle.

238:oma paino KRT (Max)	291:Kuormakaavio 1 MRT, 1xAA13 + tas. 4,5kN/m2 (Max)
239:oma paino KRT (Min)	292:Kuormakaavio 1 MRT, 1xAA13 + tas. 4,5kN/m2 (Min)
240:Tuulikuorma KRT (Max)	293:Kuormakaavio 2 MRT, AA13 molemmat kaistat (Max)
241:Tuulikuorma KRT (Min)	294:Kuormakaavio 2 MRT, AA13 molemmat kaistat (Min)
242:jarru pituussuunta (Max)	295:Lämpötilakuorma MRT (Max)
243:jarru pituussuunta (Min)	296:Lämpötilakuorma MRT (Min)
244:jarru poikkisuunta (Max)	297:Tuulikuorma MRT (Max)
245:jarru poikkisuunta (Min)	298:Tuulikuorma MRT (Min)
246:Jarrukuorma KRT (Max)	299:Jarrukuorma MRT (Max)
247:Jarrukuorma KRT (Min)	300:Jarrukuorma MRT (Min)
255:tasainen 4,5kN/m2 (Max)	301:MRT2 (Max)
256:tasainen 4,5kN/m2 (Min)	302:MRT2 (Min)
259:Kuormakaavio 1 KRT, 1xAA13 + tas. 4,5kN/m2 (Max)	303:KRT2 (Max)
260:Kuormakaavio 1 KRT, 1xAA13 + tas. 4,5kN/m2 (Min)	304:KRT2 (Min)
265:Kuormakaavio 2 KRT, AA13 molemmat kaistat (Max)	396:Taipuma AA13/76 + oma paino KRT palkit (Max)
266:Kuormakaavio 2 KRT, AA13 molemmat kaistat (Min)	397:Taipuma AA13/76 + oma paino KRT palkit (Min)
267:MRT1 (Max)	398:Taipuma AA13/76 + oma paino KRT ylälaatta (Max)
268:MRT1 (Min)	399:Taipuma AA13/76 + oma paino KRT ylälaatta (Min)
269:KRT1 (Max)	51:Kaista 1, AA13/42 (Max)
270:KRT1 (Min)	52:Kaista 1, AA13/42 (Min)
271:TK1 (Max)	82:Kaista 2, AA13/42 (Max)
272:TK1 (Min)	83:Kaista 2, AA13/42 (Min)
273:TK2 (Max)	123:Kaista 1, AA13/76 (Max)
274:TK2 (Min)	124:Kaista 1, AA13/76 (Min)
275:TK3 (Max)	164:Kaista 2, AA13/76 (Max)
276:TK3 (Min)	165:Kaista 2, AA13/76 (Min)
277:TK4 (Max)	195:Kaista 2, AA13/42 reverse (Max)
278:TK4 (Min)	196:Kaista 2, AA13/42 reverse (Min)
279:TK5 (Max)	236:Kaista 2, AA13/76 reverse (Max)
280:TK5 (Min)	237:Kaista 2, AA13/76 reverse (Min)
281:TK6 (Max)	257:AA13 joko kaista1/kaista2 (Max)
282:TK6 (Min)	258:AA13 joko kaista1/kaista2 (Min)
283:TK7 (Max)	261:AA13 kaista 1 (Max)
284:TK7 (Min)	262:AA13 kaista 1 (Min)
285:TK8 (Max)	263:AA13 kaista 2 (Max)
286:TK8 (Min)	264:AA13 kaista 2 (Min)
287:Lämpötilakuorma KRT (Max)	305:MRT (Max)
288:Lämpötilakuorma KRT (Min)	306:MRT (Min)
289:oma paino MRT (Max)	307:KRT (Max)
290:oma paino MRT (Min)	308:KRT (Min)
	353:lävistys AA13/76 (Max)
	354:lävistys AA13/76 (Min)
	394:taipuma AA13/76 (Max)
	395:taipuma AA13/76 (Min)

Kuva 46. Kuvassa rakennemallien yhdistelyjä

#### 4.2.6 Kapasiteetin määrittäminen

Kun rakenteesta oli saatu muodostettua rakennemalli, josta voitiin rakenteen rasituksia saada ulos luotettavalla tarkkuudella, alkoi olemassa olevan rakenteen kapasiteetin tutkiminen. Lähtökohtaisesti, koska laattapalkki-mallista oltiin päädytty parhaisiin tuloksiin, tarkasteltavan rakenteen malliksi otettiin t-poikkileikkaus. Asiaa lähdettiin tutkimaan Ralf Lindbergin oppimateriaalin (versio 28.10.2011) mukaan. Ensin tulisi selvittää voiko poikkileikkausta tutkia t-poikkileikkauksena. Alla lainaus Lindbergin oppimateriaalista.

*Laattapalkin mittasuhteet vaikuttavat siihen mihin puristetun osan tehollinen korkeus  $y$  ulottuu. Jos  $y < h_f$  on palkki ns. kapeauumainen ja sen mitoitus suoritetaan samaan tapaan kuin suorakaidepalkilla puristusvyöhykkeen sijaitessa pelkästään laattaosuudella. Jos taas  $y > h_f$  on rakenne leveäuumainen. Tässä tapauksessa eivät suorakaidepoikkileikkauksen kaavat tuota oikeaa lopputulosta ja rakenne on mitoittettava laattapalkkina. Raja leveäuumaisen ja kapeauumaisen välille saadaan kaavasta (BY 210 s. 207):*

$$\frac{A_s f_{yd}}{b_0 f_{cd}} > h_f$$

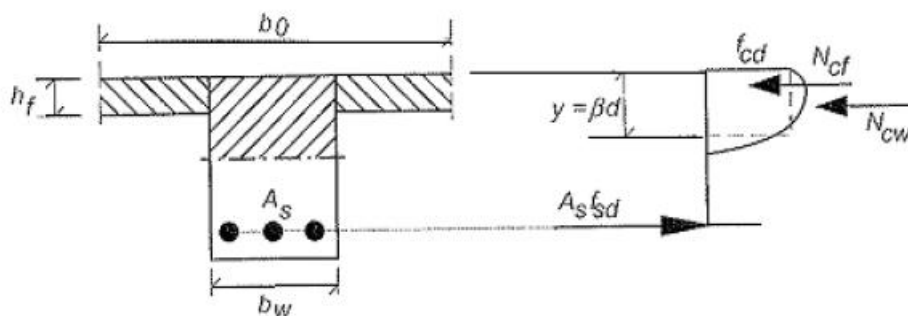
jossa:  $A_s$  = Poikkileikkauksessa vaikuttavien vetoterästen kokonaispinta-ala  
 $f_{yd}$  = Vetoterästen laskennallinen vetolujuus  
 $b_0$  = Mitoitusleveys  
 $f_{cd}$  = Betonin laskennallinen puristuslujuus

Tästä kaavasta muodostettiin mathcad laskentapohja, jossa lopputulema oli kuvan 47. mukainen

Laipan todellinen korkeus	$h_f = 180\text{mm}$
Puristetun osan tehollinen korkeus	$y = \frac{(A_{stot} f_{yd})}{b_{eff} f_{cd}} = 68.471 \text{ mm}$

Kuva 47. Kuvassa laskennasta saatu puristetun puolen tehollinen korkeus  $y$

Puristetun osan tehollinen korkeus  $y$  jäi pienemmäksi kuin ylälaipan todellinen korkeus  $h_f$  (kuva 48). Tällöin kyseistä poikkileikkausta ei voi tutkia t-poikkileikkauksena, vaan sillan pituussuuntaiset palkit täytyy tutkia normaaleina suorakaidepalkkeina, eikä ylälaattaa voi hyödyntää tarkasteltaessa näitä palkkeja. Tämän jälkeen palkit laskettiin suorakaidepoikkileikkauksina. Laskenta suoritettiin mathcad laskentapohjilla, jotka on tehty NCCI 2 – Betonirakenteiden suunnittelu-ohjeen mukaisesti. Laskentapohjissa on huomioitu kantavuuslaskenta ohjeen mukaiset eroavaisuudet, kuten betonin puristuskestävyyden kasvattaminen  $5 \text{ N/mm}^2$ .



Kuva 48. Kuvassa puristetun  $t$ -poikkileikkauksen periaatekuva.

Laskennassa tarkasteltiin myös siltakohteen laakereita ja perehdyttiin niiden kantavuuslaskentaan. Kantavuuslaskenta ohje antaa rullalaakereiden kantavuudelle kaavan (kuva 49). Tästä kaavasta voidaan määrittää rullalaakerin suurin kestävyys. Kuvissa 50. ja 51. on esitetty kotelopalkkisillan laakerit. Toisessa päässä siltaa on rullalaakeri ja toisessa päässä lyijylevyalaakeri. Näille molemmille määriteltiin kantavuus ja rasitukset. Rullalaakereiden kapasiteetiksi on kantavuuslaskentaohjeen mukaisilla laskelmilla saatu 1910kN ja lyijylaakereiden 2290kN. Laakereiden suurimmiksi kuormiksi laskentamallista on saatu 654,9kN (kuva 52). Laakereille ei näin ollen muodostu kapasiteetin ylittäviä rasituksia.

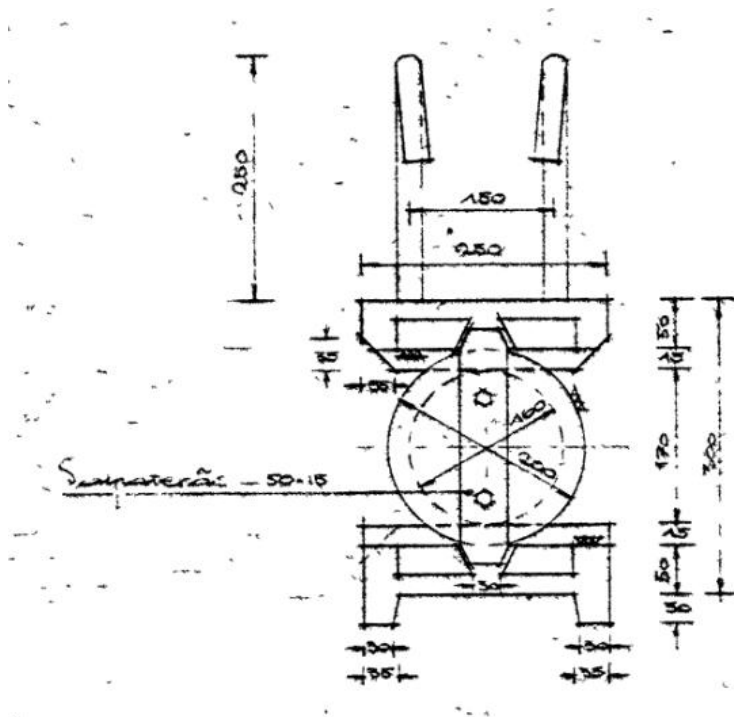
Suurin rullan kantavuus  $A_{sall}$  [kN] lasketaan seuraavalla kaavalla /23/

$$A_{sall} = K \cdot r \cdot l \quad (7.3)$$

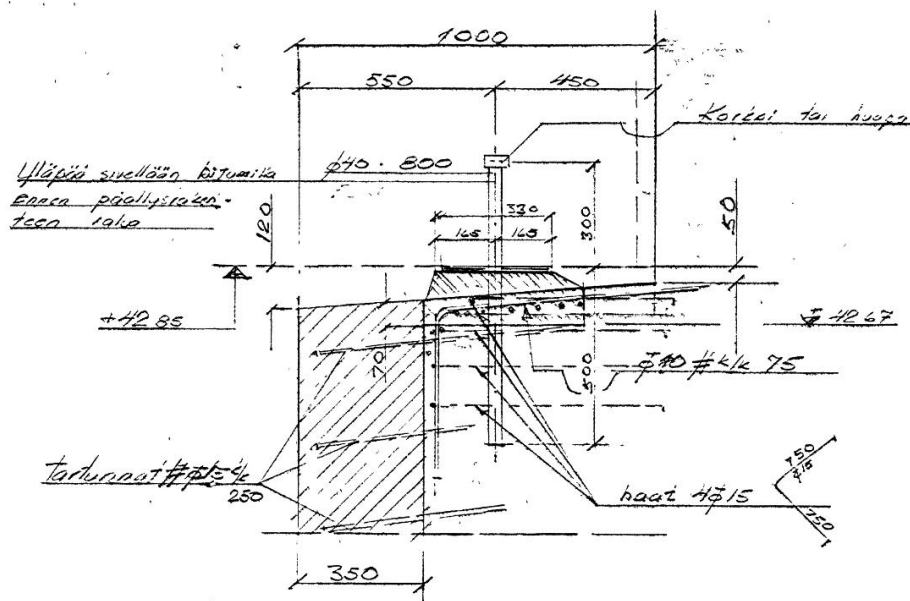
missä

K	on kerroin, joka saadaan kuvasta 7.1 (kuvaajan laakerin materiaalityypin edessä suluissa oleva arvo) [kN/cm <sup>2</sup> ]. Kuvasta 7.1 puuttuvilla erikoislujilla teräksillä (mm. Kreuz) $K = 7,5$ .
r	on rullan säde [cm]
l	on rullan pituus [cm]

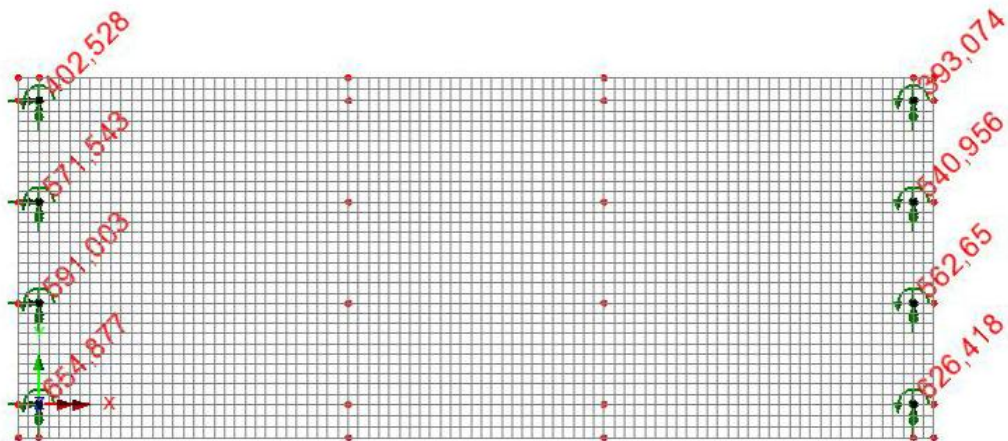
Kuva 49. Rullalaakereiden kantavuuskaava



Kuva 50. Kuvassa kotelopalkkisillan rullalaakeri



Kuva 51. Kuvassa kotelopalkkisillan lyijylevyalaakeri



Kuva 52. Kuvassa kotelopalkkisillan laakereille syntyvät rasitukset [kN]

#### 4.2.7 Tulokset

Rakennemallien tulokset on koottu Liitteisiin 2 ja 3. Laattapalkkimallista esitetään ylälaatan ja pitkittäis/poikkitaipalkkien leikkaus ja momenttirasitukset. Kotelomallista esitetään ylä- ja alalaatan momenttirasitukset murtorajatilassa. Näistä on esitetty myös taulukoidut määräävät rasitukset ja kapasiteetit kyseisissä kohdissa. Lisäksi taulukossa on ilmoitettu määräävien kohtien poikkileikkauksen suuruus ja poikkileikkauksessa olevan terästen määrä. Näiden perusteella on laskettu käyttöasteet kullekin kohtaa.

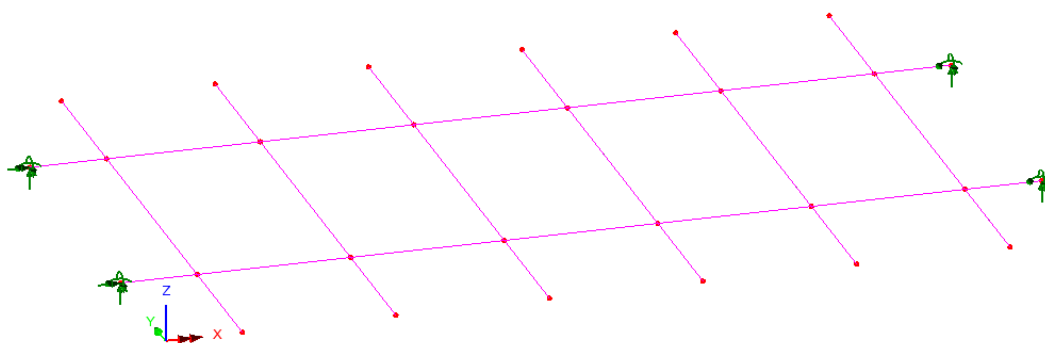
Käyttöasteiden perusteella voidaan rakenteesta päätellä, että suurimmat kapasiteetin ylitykset tapahtuvat laattojen momenttirasituksissa. Varsinkin ylälaatan pitkittäissuunnassa. Ylitykset ovat sen verran suuria muihin rakenteen kohtien käyttöasteisiin verrattuna, että luottamus mallien luotettavuuteen toimintaan jäykkyyksien jakaantumisen suhteen laatoille ja palkeille herättää epäilyksiä. Alkuperäinen maksimikuormitus kotelopalkkisillalle on 40 tn kaivuri. Tämä kaivuri kerkeää kokonaisuudessaan siltakannelle. Nykyisestä AA13 76 tn ajoneuvosta n. 90% kerkeää yhtäaikaaisesti siltakannelle eli kokonaiskuormana 68 tn. Kuormat ovat siis kasvaneet entisistä suunnittelukuormista karkeasti ottaen 1,7 kertaisiksi (3,7kertainen jos 2xAA13 ajoneuvo). Pitkittäispalkkien alapinnan taivutusrasituksen käyttöaste murtorajatilassa on 31% ja käyttörajatilassa 18,8% uusille AA13 kuormituksille. Ylälaatan pitkittäistaivutusrasitus käyttöaste murtorajatilassa 307% ja käyttörajatilassa 481% uusille AA13 kuormituksille. Pitkittäispalkkien ja ylälaatan pitkittäissuunnan käyttöasteiden ero on paljon suurempi kuin 1,7 kertainen (tai 3,7 kertainen). Jos tämä olisi todellinen tilanne, herää kysymys, miten silta on mitoitettu aiemmin, jotta se olisi saatu kestäämään 40 tn kaivuri? Vaikuttaa siis siltä, että palkkien ja laatan taivutusmomenttien käyttöasteiden ero on liian suuri, jotta ne olisivat jakautuneet oikein jäykkyyksiensä suhteessa. Tästä epäsuhdasta johtuen laattapalkkimallin jännitysten jakaantuminen ei vaikuta todelliselta. Tämä ei tarkoita sitä, että jäykkyyksien suhteen tasaisemmin jakautuneena ylälaatan rasitusten käyttöaste alittaisi 100% ja laatan kestävyys riittäisi uusille AA13 kuormille, mutta nykyisellään ylitykset tuntuvat liian suurilta. Huomiona tässä on myös kappaleessa 4.2.8 käsitelty arinamalli asia, joka uusimmissa sillansuunnitteluohjeissa on mukana.

Kokonaisuudessaan tulokset laattapalkki ja kotelopalkkimalleista vaikuttavat järkevän oloisilta, pois lukien taivutusrasitukset, jotka tuntuvat jakaantuvan väärässä suhteessa palkkien ja laattojen välille.

#### 4.2.8 Huomiot, poikkeukset ja jatkotoimenpiteet

Seuraavaksi tarkastellaan yleistyyksiä ja muita huomion arvoisia seikkoja, jotka vaikuttavat mallien ja todellisen rakenteen eroihin. Rakennemallissa ei ole huomioitu kotelon kulmissa sijaitsevia betonivahvisteita, jotka lisäävät laatta- ja palkkiosan keskinäistä jäykkyyttä. Laattapalkkimallissa ei myöskään ole alalaattaa, joka vähentää koko rakenteen vääntöjäykkyyttä.

Seuraavaksi jos kohteesta haluttaisiin muodostaa mallia, joka huomioi tarkemmin ylälaatan ja palkkien keskinäistä jäykkyyden jakaantumista tulisi tehdä niin sanottu arinamalli. Tällaisessa arinamallissa sekä laattaosa että palkkosat olisi muodostettu thick-beam-palkkeina, kuva 53. Tällöin kansilaatan palkkiosat voisi määrittää vähemmän jäykiksi kuin ne todellisuudessa ovat. Tällöin jäykkyyksien jakaantuminen muuttuisi. Tähän on otettu kantaa uusimmassa NCCI-2 ohjeistuksessa (kuva 54).



Kuva 53. Periaatekuva arinamallista

Laattapalkkisillan arinamallin muodostamisessa noudatetaan seuraavia periaatteita:

- Pääkannattimen voimasuureita laskettaessa käytetään pääsysteemillä halkeilemattoman rakenteen vääntöjäykkyyden arvoja. Kansilaatan kiinnitysastetta ja voimasuureita laskettaessa otaksutaan pääkannattimien vääntöjäykkyydeksi kuitenkin vain puolet halkeilemattoman rakenteen vääntöjäykkyydestä.
- Poikittaisten laattakaistojen pituudeksi otaksutaan pääkannattimien keskiöväli. Laattakaistan jäykkyyden arvoja laskettaessa otetaan huomioon jäykkyyden muutos koko tällä välillä.
- Jos laatta on poikkisuunnassa teräsbetonirakenne, otaksutaan se halkeilleeksi ja sen jäykkyydeksi 50 % halkeilemattoman poikkileikkauksen jäykkyydestä. Laatan voimasuureita määritettäessä otaksutaan laatta kuitenkin halkeamattomaksi.
- Jos laatta on poikkisuuntaan jännitetty, käytetään laskennassa halkeilemattoman poikkileikkauksen arvoja.

Taulukko 5.1 Arinamallin jäykkyysharjoitteet

	Pääpalkkien voimasuureiden laskenta	Laattakaistojen voimasuureiden laskenta
Pääpalkkien taivutusjäykkyys	1	1
Pääpalkkien vääntöjäykkyys	1 <sup>(1)</sup>	0,5 <sup>(1)</sup>
Laatan taivutusjäykkyys	0,5 <sup>(2)</sup>	1

1) tarkoitetaan kaavan (5.4) mukaista jäykkyyttä

2) kerroin on 1, jos laatta on poikittaisessa suunnassa jännitetty

Kuva 54. Kuvakaappaus NCCI-2 ohjeesta arinamallin muodostamisen periaatteista.

#### 4.2.9 Yhteenveto

Tämä kotelopalkkisillan rakenteen tutkiminen ei kokonaisuudessaan ole täysivaltainen määritelmä voitaisiinko kyseiselle kohteelle antaa lupa jatkaa yleisessä liikenteessä vai tulisiko kohteelle määritellä painorajoituksia. Kohteesta tutkittiin vain ja ainoastaan sillan rakennetta. Opinnäytetyössä ei tutkittu muun muassa siltakohteen laakerialustojen kantokykyä. Lisäksi rakennemallien tutkintaa tulisi jatkaa paremman kokonaiskuvan saamiseksi kohteesta.

Kohteesta onnistuttiin tekemään kaksi osittain toimivaa rakennemallia. Näissä malleissa epäilyttäväksi jäi voimien jakaantuminen kansilaatan ja palkkien välillä. Tämän suhteen tulisikin muodostaa vielä erillinen laskentamalli, jolla palkkien ja laatan välistä toimivuutta voitaisiin tutkia tarkemmin. Tällainen seuraava malli voisi olla arinarakennemalli, jossa laatan jäykkyysarvoja voitaisiin pienentää, koska ne mallinnettaisiin palkkeina. Lusaksessa laattarakenteen jäykkyyttä ei voi muuttaa manuaalisesti, mutta palkin jäykkyyttä voi. Tällainen arinapalkkimalli voisi myös paremmin huomioida, sitä miten sillan kokonaispitkittäistaipumasta johtuen ylä- ja alalaatta taipuvat ja miten niille tästä johtuen syntyy vääntömomenttia. Lusaksesta on otettu taivutusmomentti arvot, jotka huomioivat vääntömomentin osana kokonaistulosta.

Lisäksi tulisi miettiä, millaisella mallilla koko kotelon alalaatan toiminta saataisiin kuvattua mahdollisimman todenmukaisena ja näin ollen koko rakenteen toiminta. Opinnäytetyössä tutkittiin miten tällainen kotelopalkkisilta tulisi mallintaa, jotta se vastaisi mahdollisimman todenmukaisesti rakennetta. Mallin tutkintaa voitaisiin edelleen jatkaa, mutta opinnäytetyöhön varattuun aikaan nähden työtä ei ole ollut tarpeellista jatkaa tiettyä rajaa pitemmälle.

## 5 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin siltojen kantavuuslaskentaa. Työssä esiteltiin Suomen siltakannan kokonaistilaa, tutustuttiin siltojen tilanteisiin yksittäisen ELY-keskuksen näkökulmasta, esiteltiin kantavuuslaskennan suorittamista ja esitettiin projektina tehty laattasillan kantavuustarkastelu sekä tutkittiin laskentamallin muodostamista betoniselle kotelopalkkisillalle. Työssä syvennettiin kantavuuslaskentaa ja sen suorittamiseen Lusas laskentaohjelmistolla. Työ toi esille vaativien laskentamallien muodostamisen haasteet ja mallien tuloksiin liittyvien tulkintojen ja oikeudenmukaisuuteen liittyvät vaikeudet. Haastavia laskentamalleja muodostettaessa varsinaisten tulosten tulkintojen teko jää aina suunnittelijalle itselleen, eikä laskentaohjelmisto välttämättä tarjoa valmista vastausta rakenteen toiminnasta.

Työn näkökulmia tullaan laajentamaan jatkossa työelämässä projektien parissa. Näissä projekteissa hyödynnetään opinnäytetyössä tehtyjä havaintoja ja huomioita. On selvää, että uusissa projekteissa tullaan tarkastelemaan entistä kriittisemmin FEM-laskennan tuloksia.



## LÄHTEET

Bridge Deck Analysis, Eugene J. O'Brien and Damien L. Keogh, First published 1999 by Taylor & Francis, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 RN. ISBN 0-419-22500-5

Bridge Deck Behaviour, Second edition, E. C. Hambly, Reprinted 1998 by Taylor & Francis, 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon, OX14 RN. ISBN 0-419-17260-2

LIIKENNEVIRASTON OHJEITA 36/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje. Voimassa 1.2.2016 alkaen toistaiseksi.

LIIKENNEVIRASTON OHJEITA XX/2015, Siltojen kantavuuslaskentaohje. Kommenttiversion 20.4.2015. Voimassa x.x.2015 alkaen toistaiseksi (koekäytössä).

Siltojen kantavuuslaskentakoulutus 23.4.2015. Liikennevirasto. Luentoaineisto.

LIIKENNEVIRASTON OHJEITA 24/2017, Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnittelu-perusteet – NCCI 1. Voimassa 6.12.2017 alkaen toistaiseksi.

LIIKENNEVIRASTON OHJEITA 24/2014, Eurokoodin soveltamisohje, Siltojen kuormat ja suunnittelu-perusteet – NCCI 1. Voimassa 5.9.2014 alkaen toistaiseksi. (Korvattu)

LIIKENNEVIRASTON OHJEITA 31/2017, Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Voimassa 30.6.2017 alkaen toistaiseksi.

LIIKENNEVIRASTON OHJEITA 13/2012, Eurokoodin soveltamisohje, Betonirakenteiden suunnittelu – NCCI 2. Voimassa 21.6.2012 alkaen toistaiseksi. (Korvattu)

LIIKENNEVIRASTON TILASTOJA 8/2017, Liikenneviraston sillat 1.1.2017. Liikenneviraston sillaston rakenne, palvelutaso ja kunto. Verkkojulkaisu

Luentomoniste syksy 2011, Ralf Lindberg, Olli Kerokoski, Tampereen Teknillinen Yliopisto

## LIITTEET

### LIITE 1: TUOTETUT AINEISTOT

Opinnäytetyössä on tehty seuraavat aineistot. Nämä aineistot jäävät salaisiksi ja vain työnantajan käyttöön.

#### Case 1, Betonilaattasilta:

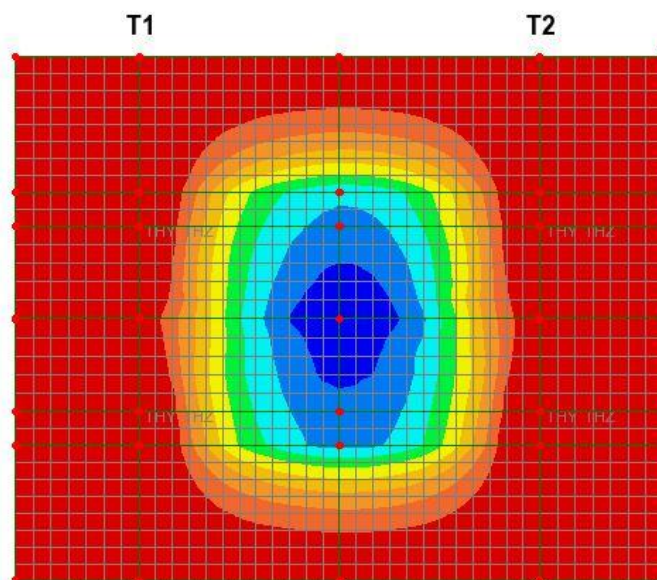
- Laskelmat Osa A kuormat
- Laskelmat Osa B Alusrakenteet
- Laskelmat Osa C päällysrakenne
- Laskelmat Osa D päätypalkki
- Kantavuuslaskentaraaportti
- Lusas rakennemalli

#### Case 2, Kotelopalkkisilta:

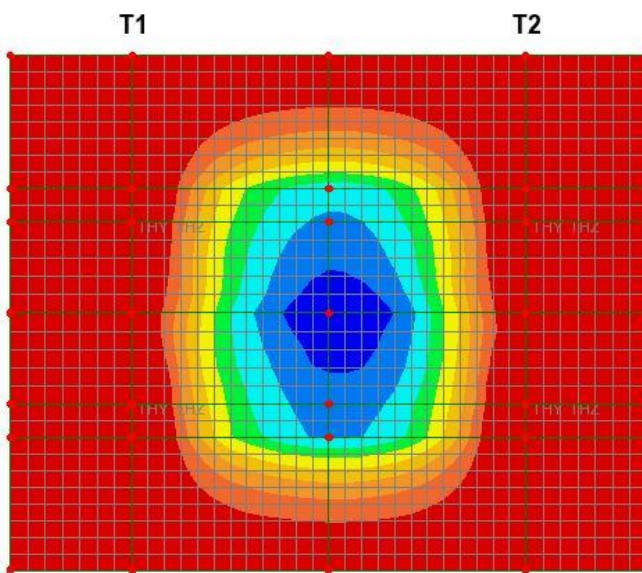
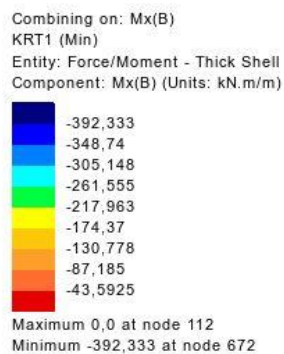
- Rakennemallit, laattapalkki- ja kotelopalkkimallit
- Kootut Laskelmat

## LIITTEET

## LIITE 2: LAATTASILLAN RASITUSKUVIOT



*Laatan alapinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

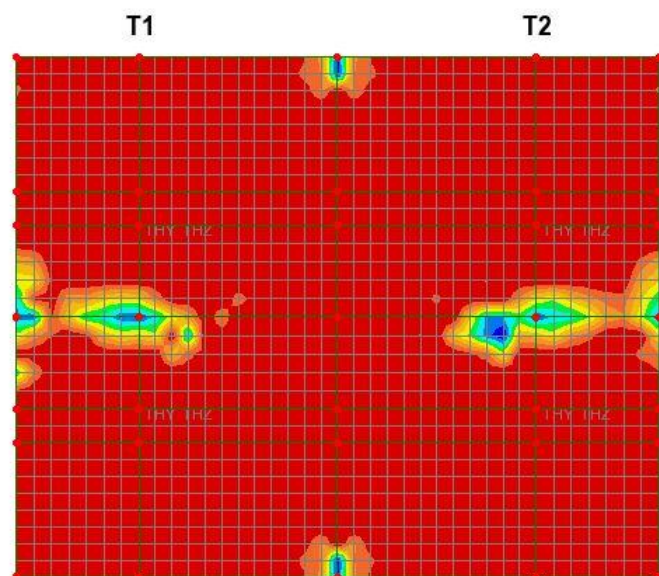


*Laatan alapinnan pitkittäiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*

Combining on: My(B)  
 MRT1 (Min)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(B) (Units: kN.m/m)

-26,6585
-23,6965
-20,7344
-17,7724
-14,8103
-11,8482
-8,88618
-5,92412
-2,96206

Maximum 0,0 at node 109  
 Minimum -26,6585 at node 642

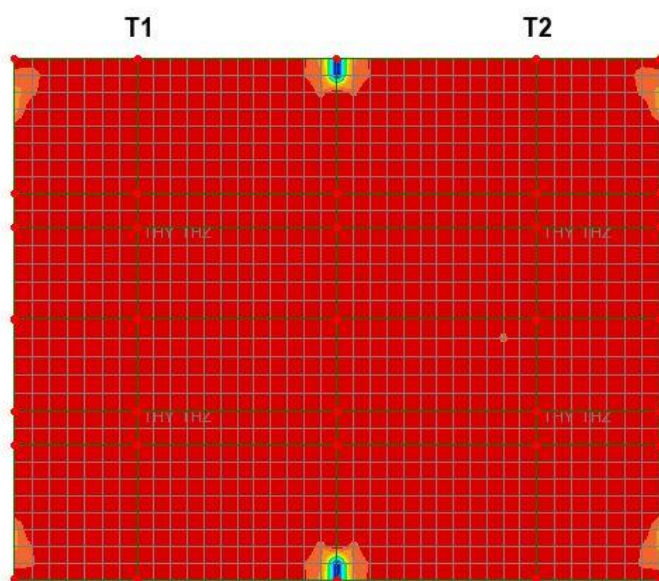


*Laatan alapinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Combining on: My(B)  
 KRT1 (Min)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(B) (Units: kN.m/m)

-20,1235
-17,8876
-15,6516
-13,4157
-11,1797
-8,9438
-6,70785
-4,4719
-2,23595

Maximum 0,0 at node 70  
 Minimum -20,1235 at node 125



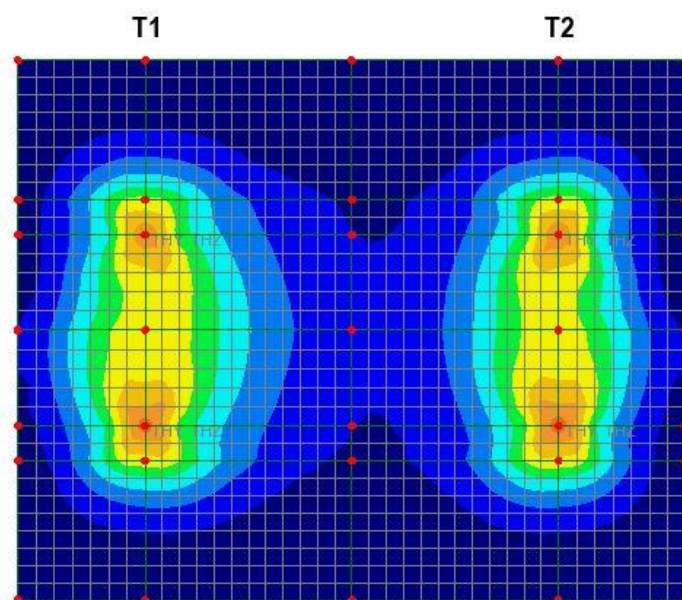
*Laatan alapinnan poikittaiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*



Combining on: Mx(T)  
 MRT1 (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Mx(T) (Units: kN.m/m)



Maximum 719,073 at node 488  
 Minimum 0,910688 at node 1256

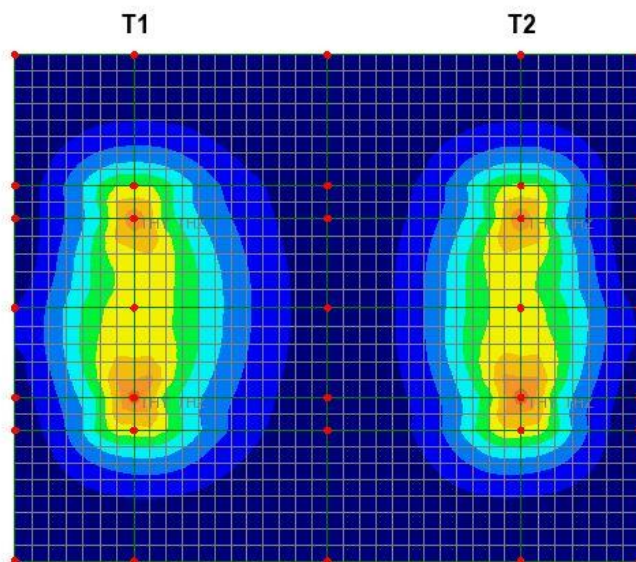


*Laatan yläpinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Combining on: Mx(T)  
 KRT1 (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Mx(T) (Units: kN.m/m)

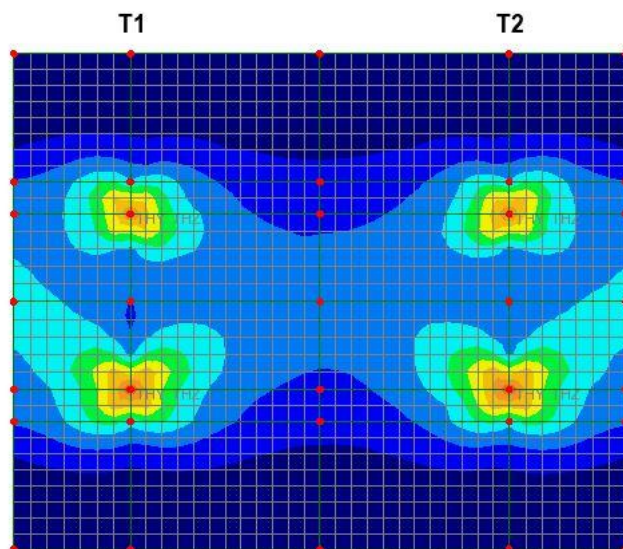
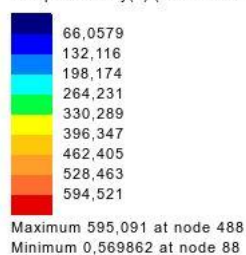


Maximum 561,972 at node 488  
 Minimum 0,136907 at node 1256



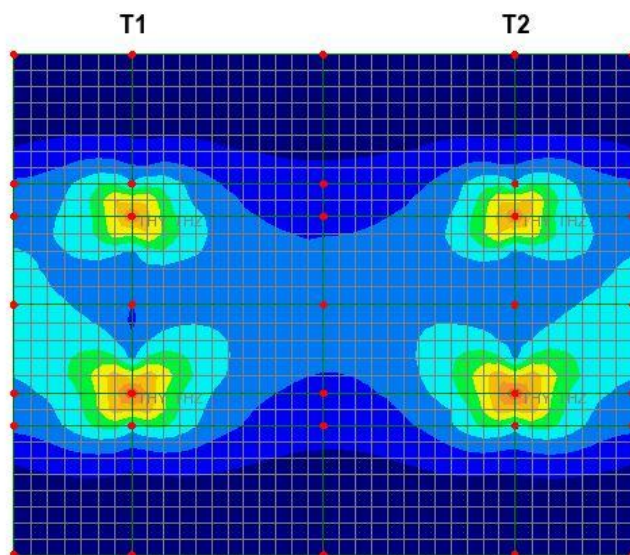
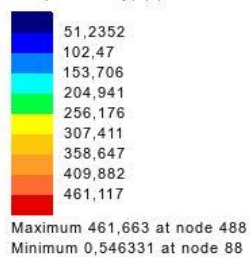
*Laatan yläpinnan pitkittäiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*

Combining on: My(T)  
 MRT1 (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(T) (Units: kN.m/m)



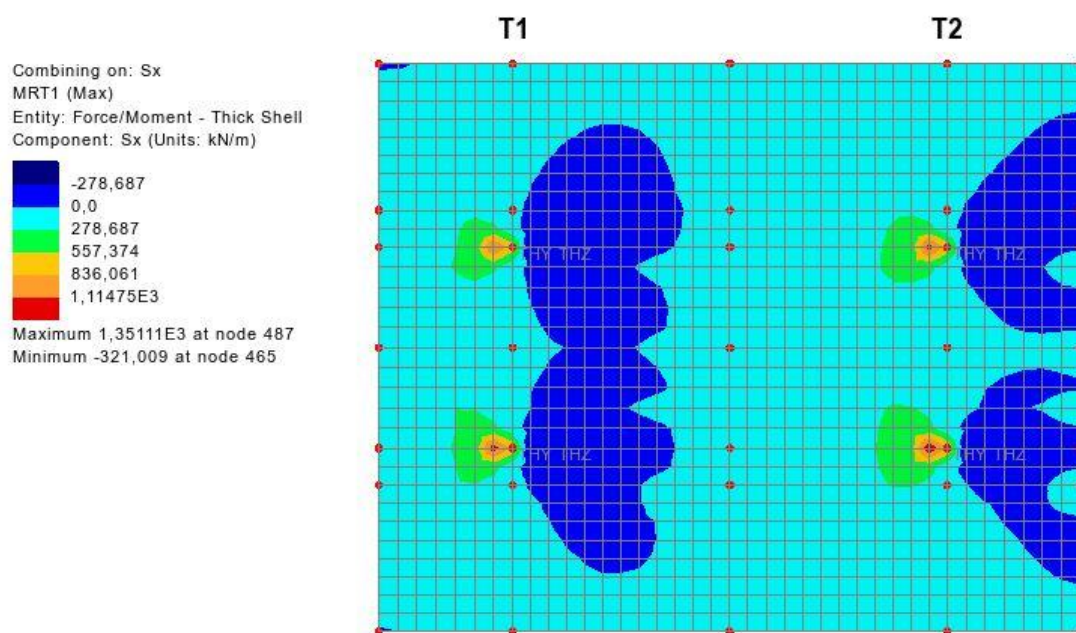
*Laatan yläpinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Combining on: My(T)  
 KRT1 (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(T) (Units: kN.m/m)

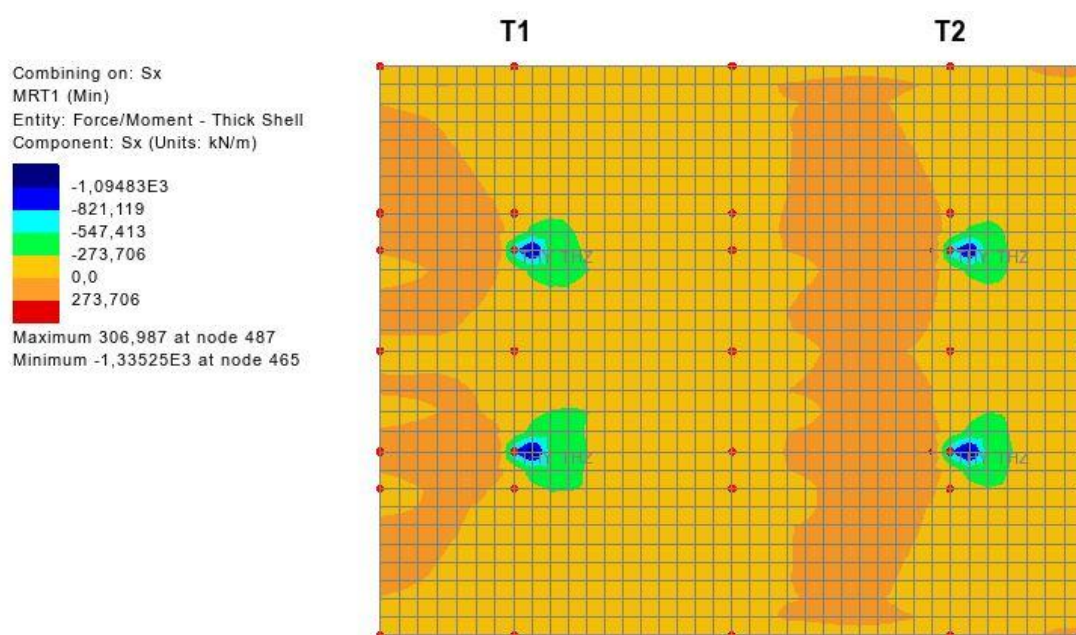


*Laatan yläpinnan poikittaiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*

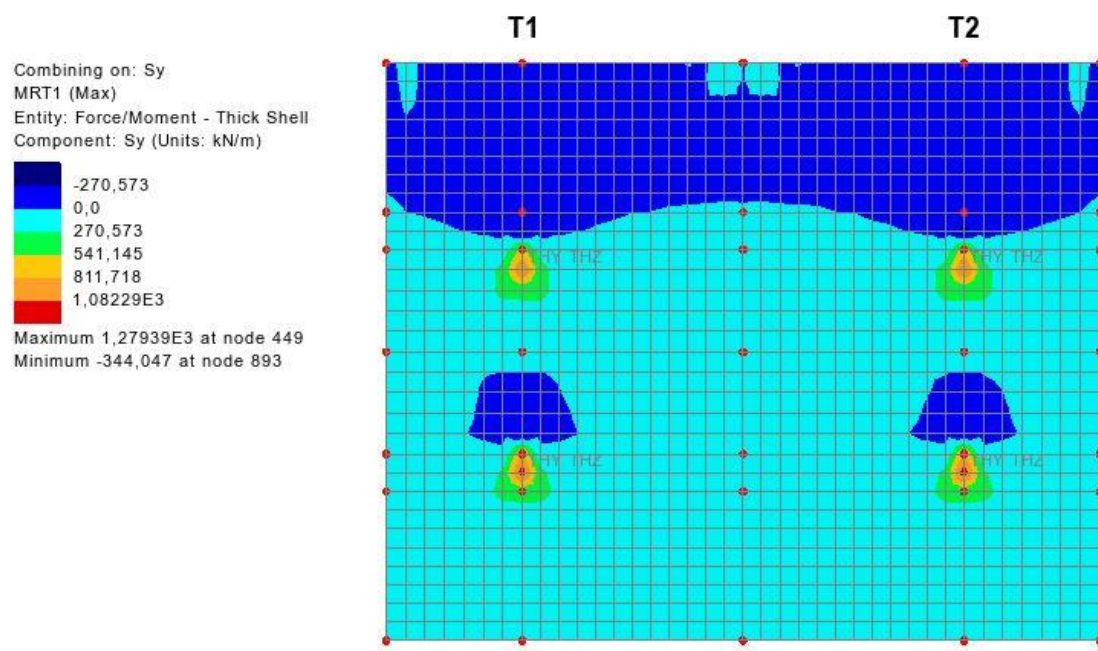




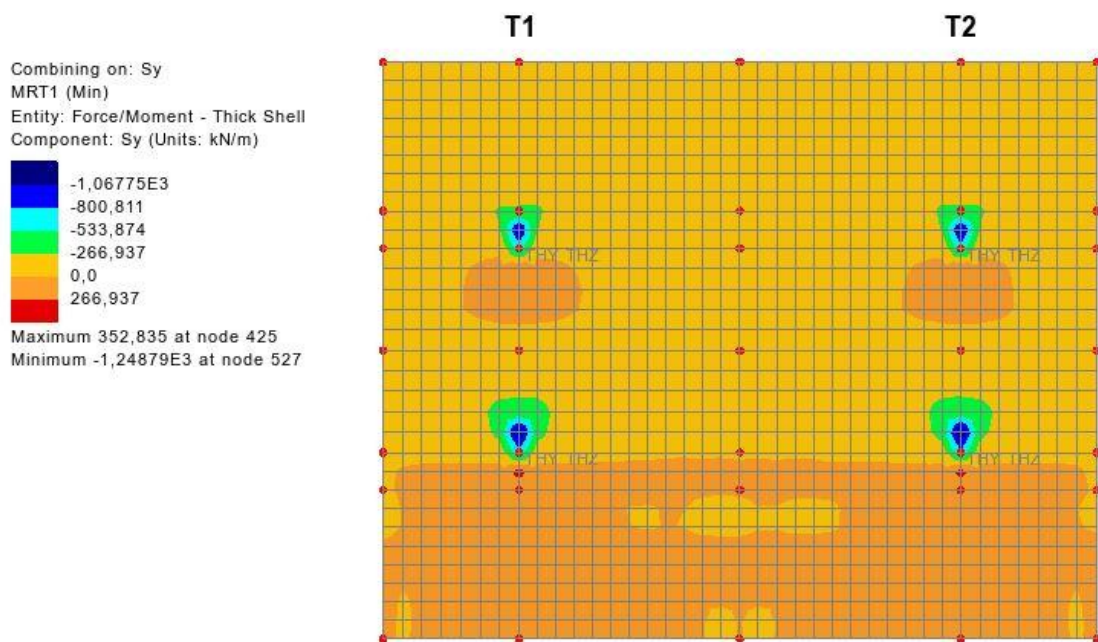
*Laatan pitkittäiset leikkausrasitukset murtorajatilassa tarkastelusuunta 1*



*Laatan pitkittäiset leikkausrasitukset murtorajatilassa tarkastelusuunta 2*



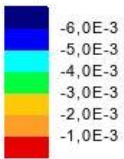
*Laatan poikittaiset leikkausrasitukset murtorajatilassa tarkastelusuunta 1*



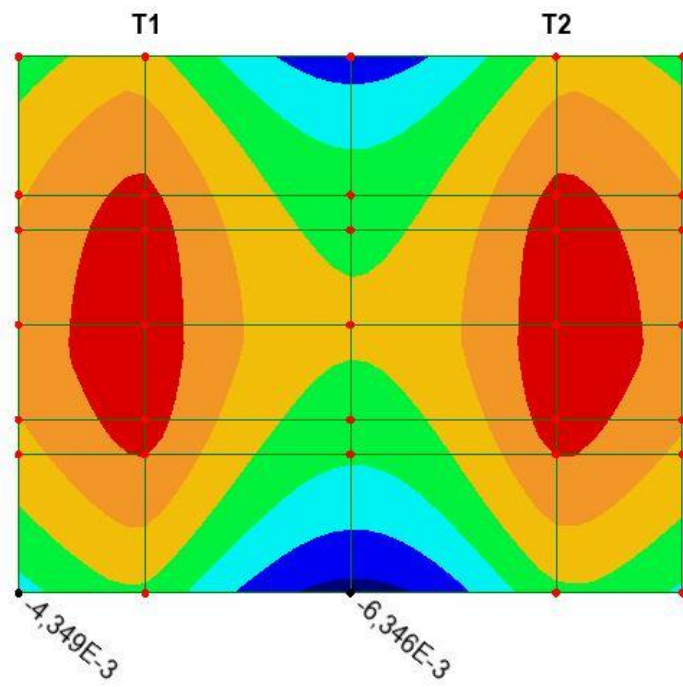
*Laatan poikittaiset leikkausrasitukset murtorajatilassa tarkastelusuunta 2*



Combining on: DZ  
AA13 + pysyvät, taipuma (Min)  
Entity: Displacement  
Component: DZ (Units: m)



Maximum -0,345985E-3 at node 63  
Minimum -6,34554E-3 at node 86

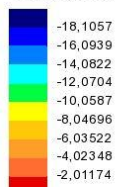


*Laatan taipumakuvaaja*

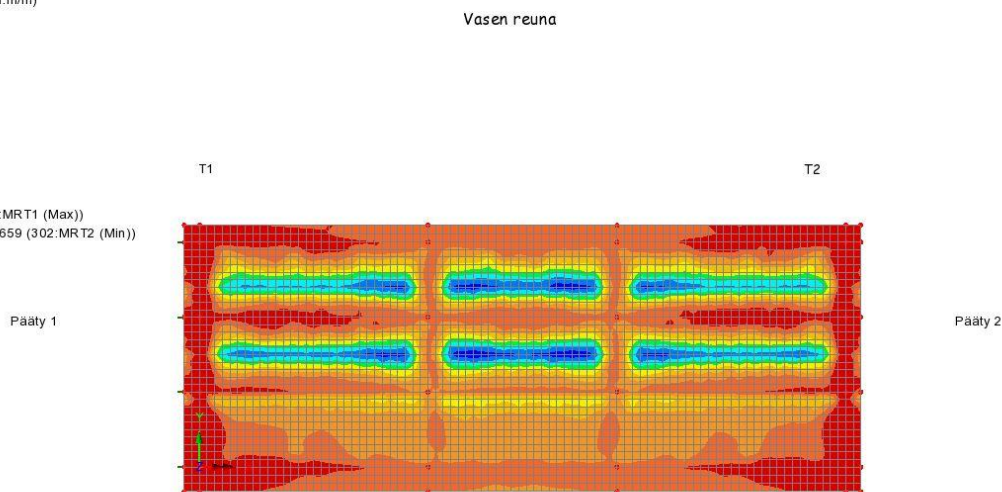
### LIITE 3: KOTELOPALKKISILLAN RASITUSKUVIOT

Laattapalkkimallin rasituskuviot:

Enveloping on: Mx(B)  
MRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: Mx(B) (Units: kN.m/m)



Maximum 0,0 at node 1 (267:MRT1 (Max))  
Minimum -18,1057 at node 1659 (302:MRT2 (Min))

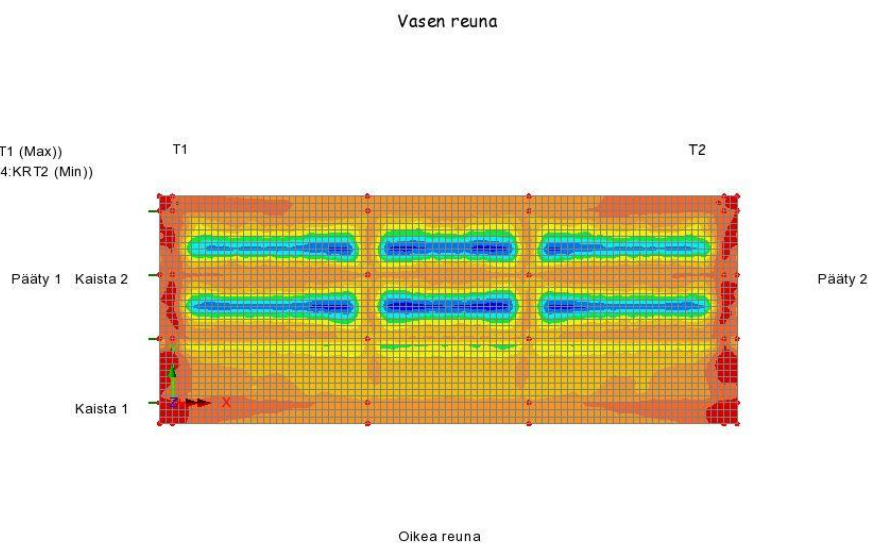


*Ylälaatan alapinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: Mx(B)  
KRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: Mx(B) (Units: kN.m/m)

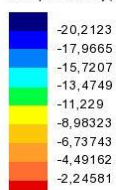


Maximum 0,0 at node 182 (269:KRT1 (Max))  
Minimum -16,687 at node 1659 (304:KRT2 (Min))



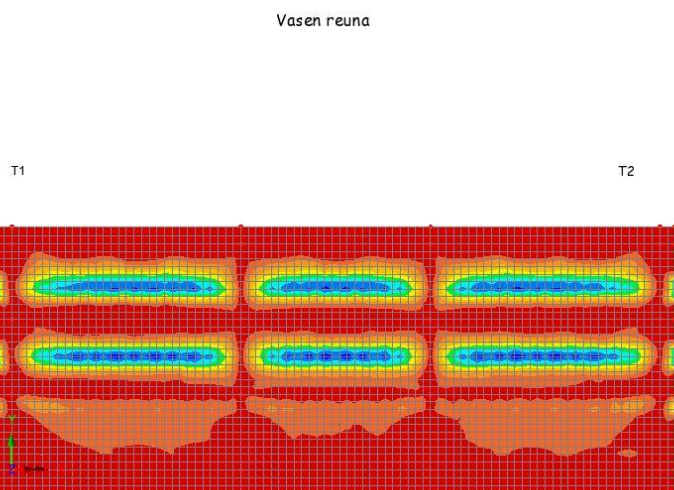
*Ylälaatan alapinnan pitkittäiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*

Enveloping on: My(B)  
MRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: My(B) (Units: kN.m/m)



Maximum 0,0 at node 1 (267:MRT1 (Max))  
Minimum -20,2123 at node 1667 (268:MRT1 (Min))

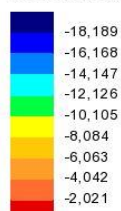
Pääty 1



Oikea reuna

*Ylälaatan alapinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

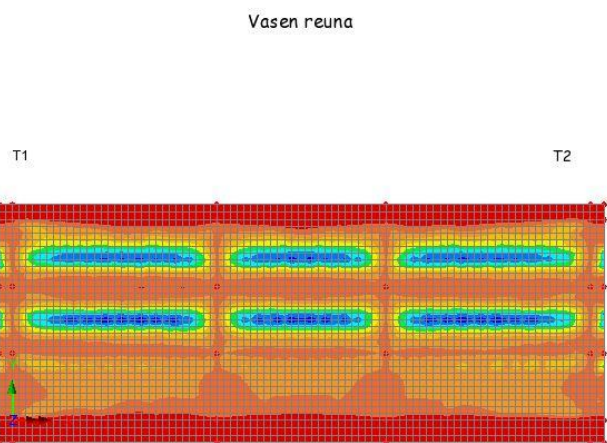
Enveloping on: My(B)  
KRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: My(B) (Units: kN.m/m)



Maximum 0,0 at node 1 (269:KRT1 (Max))  
Minimum -18,189 at node 1667 (270:KRT1 (Min))

Pääty 1 Kaista 2

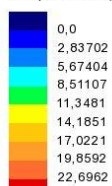
Kaista 1



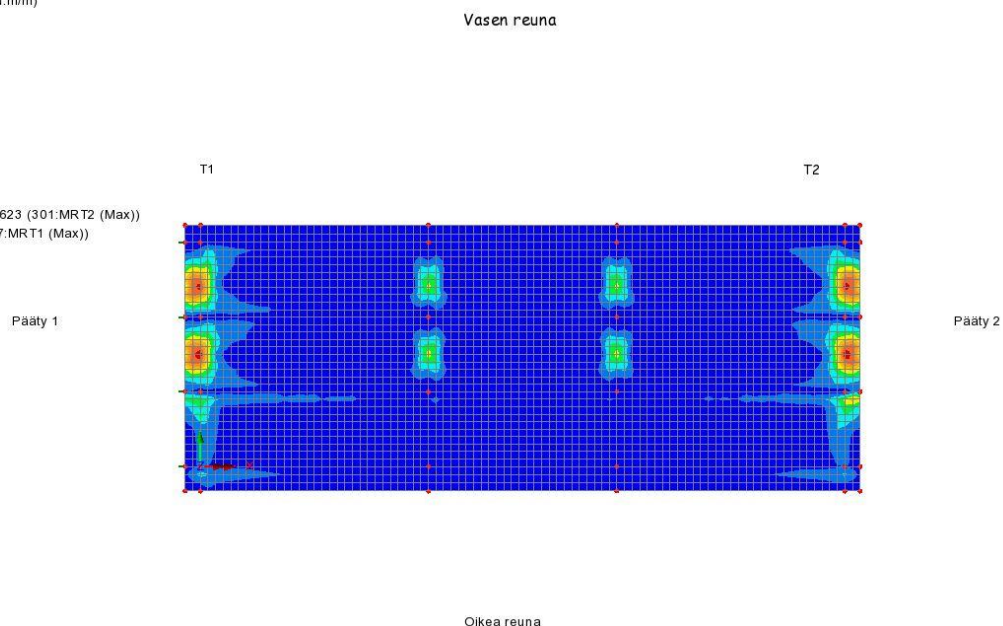
Oikea reuna

*Ylälaatan alapinnan poikittaiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*

Enveloping on: Mx(T)  
MRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: Mx(T) (Units: kN.m/m)



Maximum 25,5332 at node 1623 (301:MRT2 (Max))  
Minimum 0,0 at node 16 (267:MRT1 (Max))

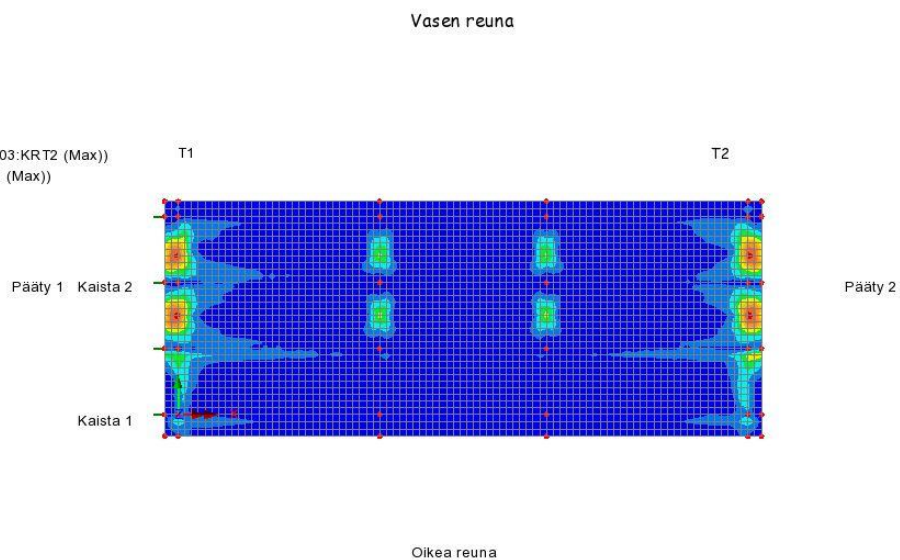


### *Ylälaatan yläpinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: Mx(T)  
KRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: Mx(T) (Units: kN.m/m)



Maximum 20,2171 at node 1623 (303:KRT2 (Max))  
Minimum 0,0 at node 16 (269:KRT1 (Max))



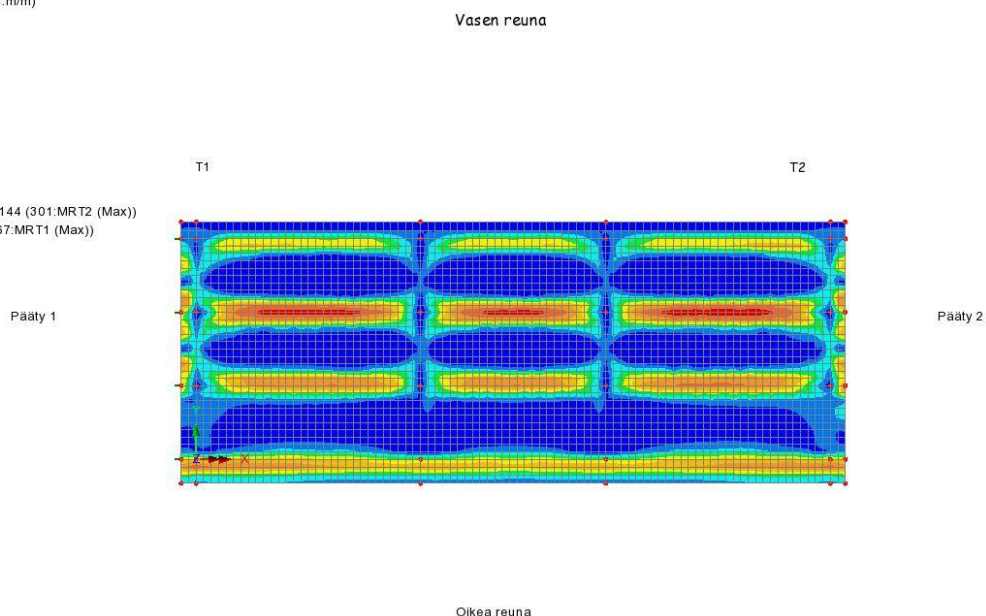
### *Ylälaatan yläpinnan pitkittäiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*



Enveloping on: My(T)  
MRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: My(T) (Units: kN.m/m)

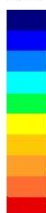


Maximum 16,7396 at node 2144 (301:MRT2 (Max))  
Minimum 0,0 at node 569 (267:MRT1 (Max))

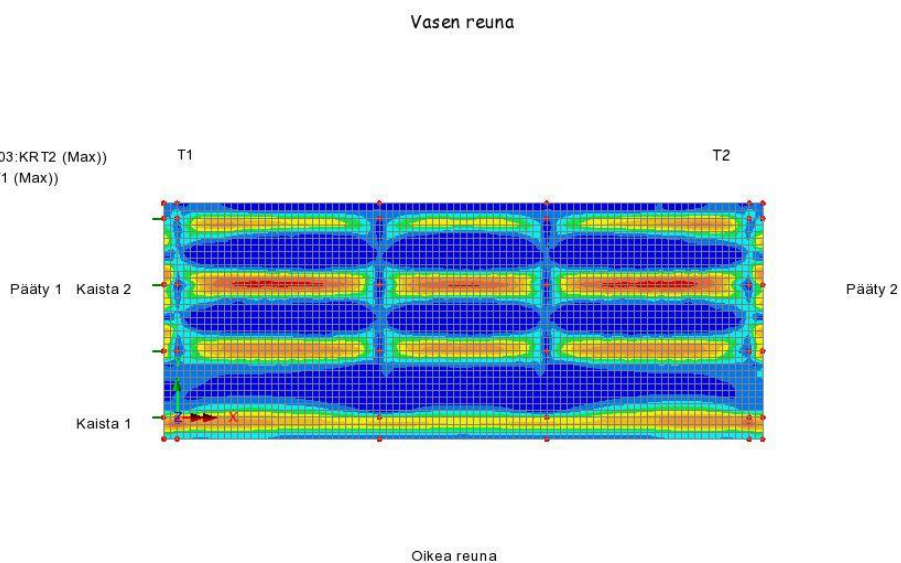


### *Ylälaatan yläpinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My(T)  
KRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick Shell  
Component: My(T) (Units: kN.m/m)

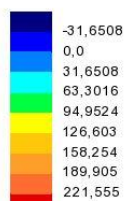


Maximum 14,0291 at node 2144 (303:KRT2 (Max))  
Minimum 0,0 at node 656 (269:KRT1 (Max))

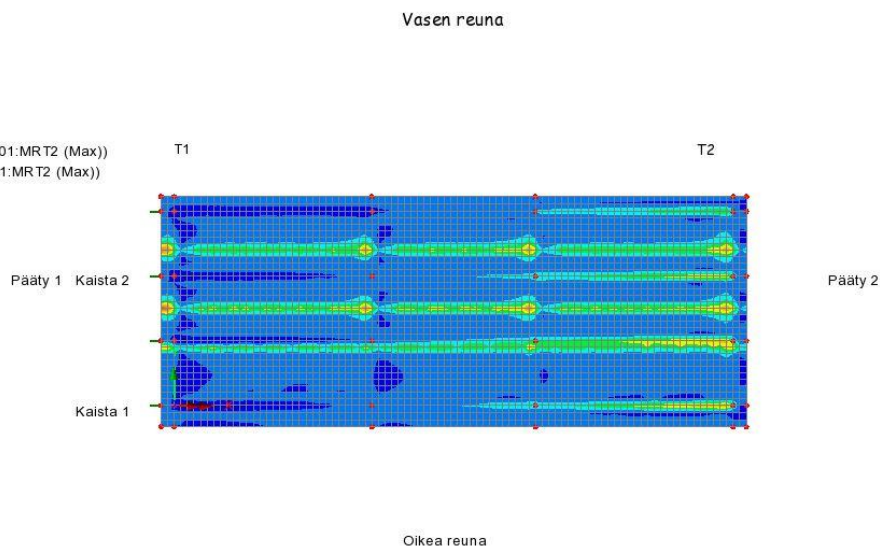


### *Ylälaatan yläpinnan poikittaiset momenttirasitukset käyttörajatilassa*

Enveloping on: Sx  
 MRT (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Sx (Units: kN/m)

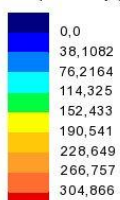


Maximum 231,299 at node 1621 (301:MRT2 (Max))  
 Minimum -53,5577 at node 274 (301:MRT2 (Max))

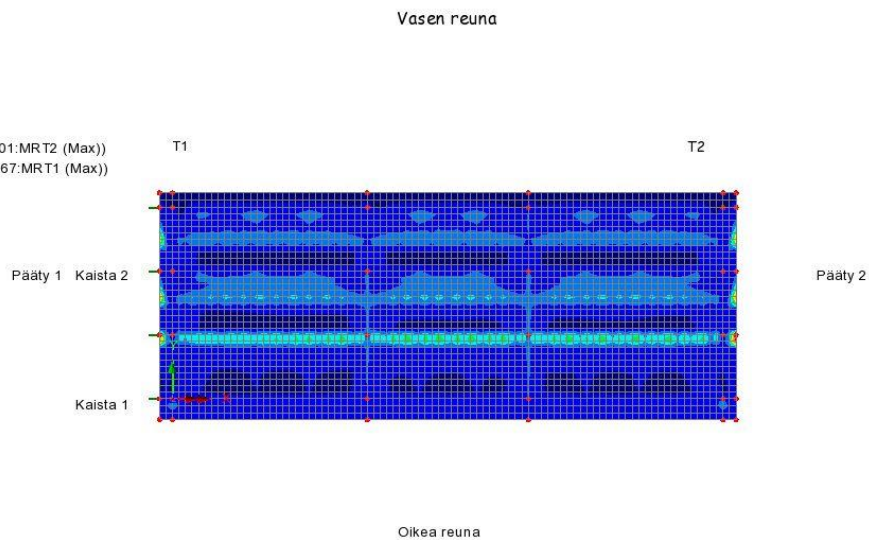


### *Ylälaatan pitkittäiset leikkausrasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: Sy  
 MRT (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Sy (Units: kN/m)

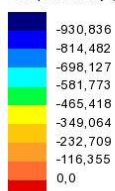


Maximum 332,545 at node 1170 (301:MRT2 (Max))  
 Minimum -10,4289 at node 3148 (267:MRT1 (Max))

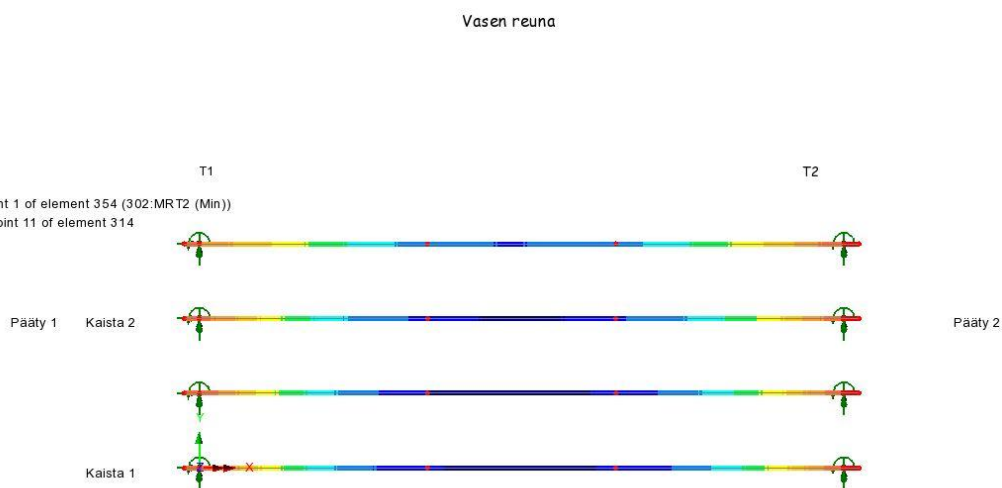


### *Ylälaatan poikittaiset leikkausrasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My  
MRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
Component: My (Units: kN.m)



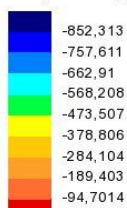
Maximum 23,0902 at Gauss point 1 of element 354 (302:MRT2 (Min))  
Minimum -1,0241E3 at Gauss point 11 of element 314



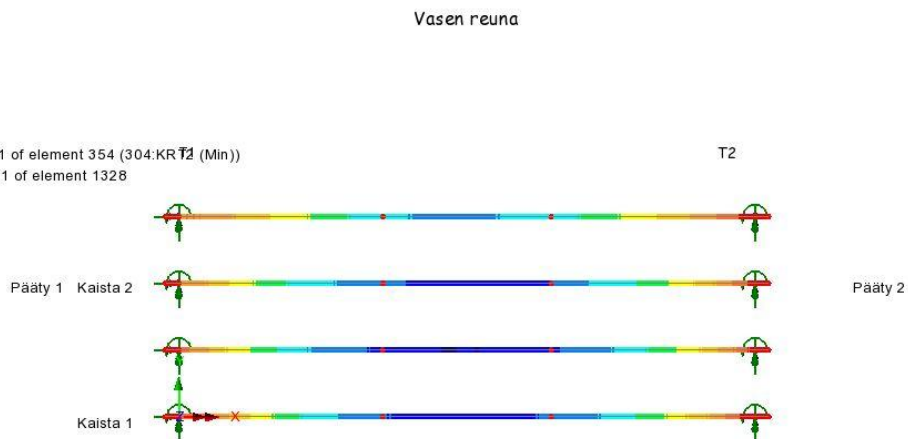
Oikea reuna

### *Pitkittäispalkkien alapinnan momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My  
KRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
Component: My (Units: kN.m)



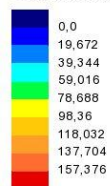
Maximum -2,73861 at Gauss point 1 of element 354 (304:KRT2 (Min))  
Minimum -855,051 at Gauss point 11 of element 1328



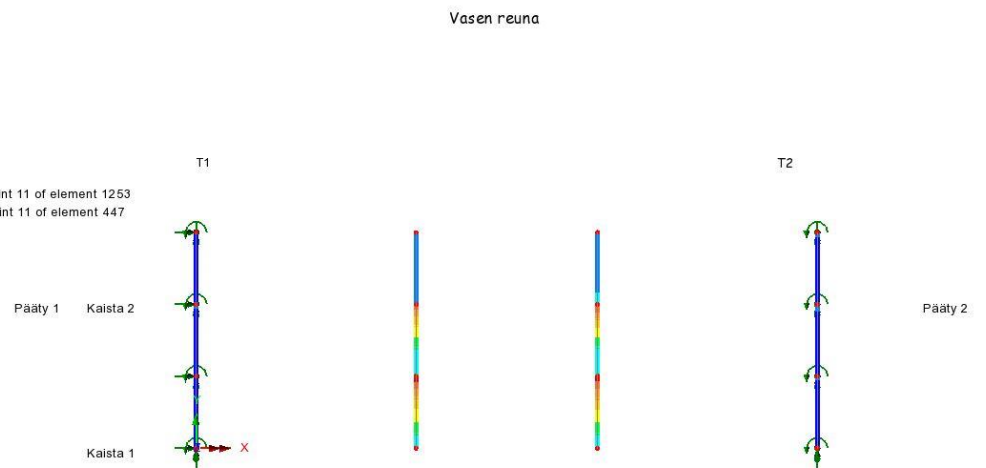
Oikea reuna

### *Pitkittäispalkkien alapinnan momenttirasitukset käyttörajatilassa*

Enveloping on: My  
MRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
Component: My (Units: kN.m)



Maximum 175,688 at Gauss point 11 of element 1253  
Minimum -1,35999 at Gauss point 11 of element 447



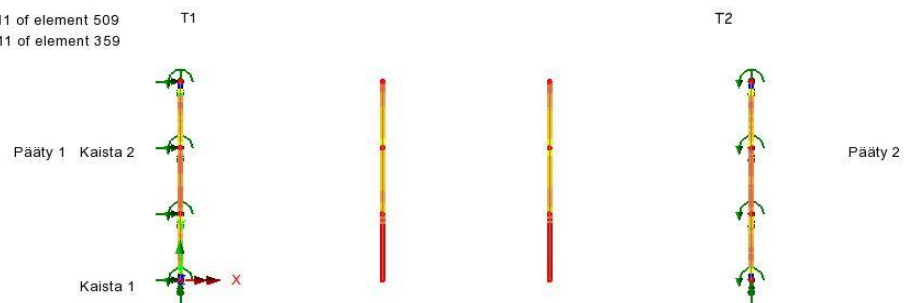
Oikea reuna

### Poikittaispalkkien alapinnan momenttirasitukset murtorajatilassa

Enveloping on: My  
KRT (Min)  
Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
Component: My (Units: kN.m)



Maximum 6,94167 at Gauss point 11 of element 509  
Minimum -121,561 at Gauss point 11 of element 359

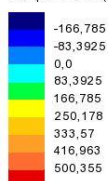


Oikea reuna

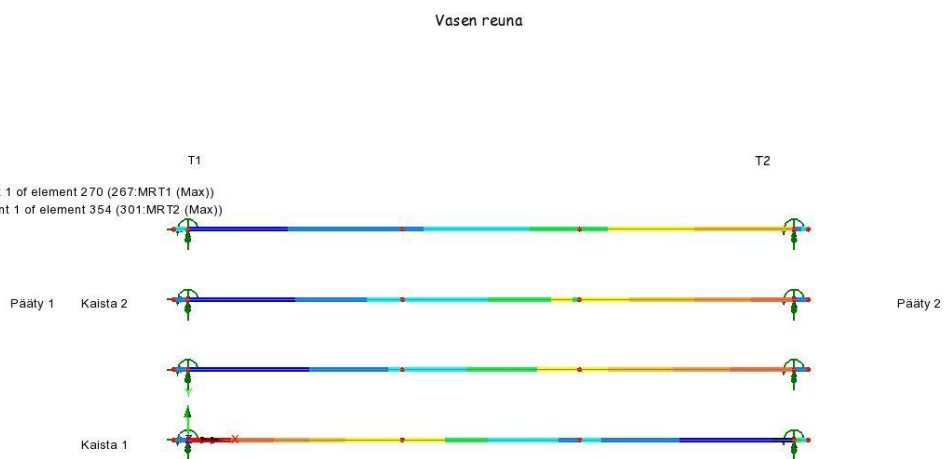
### Poikittaispalkkien alapinnan momenttirasitukset käyttörajatilassa



Enveloping on: Fz  
MRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
Component: Fz (Units: kN)

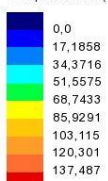


Maximum 573,71 at Gauss point 1 of element 270 (267:MRT1 (Max))  
Minimum -176,823 at Gauss point 1 of element 354 (301:MRT2 (Max))

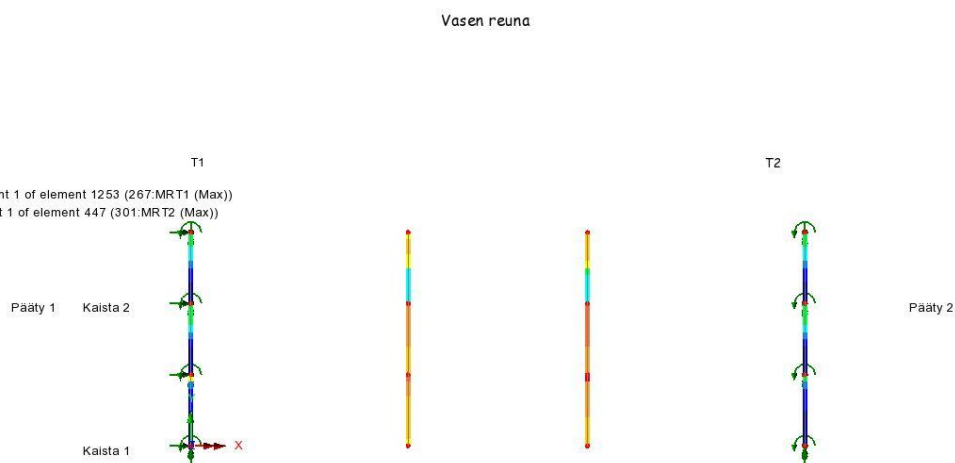


### *Pitkittäispalkkien leikkausrasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: Fz  
MRT (Max)  
Entity: Force/Moment - Thick 3D Beam  
Component: Fz (Units: kN)



Maximum 143,958 at Gauss point 1 of element 1253 (267:MRT1 (Max))  
Minimum -10,714 at Gauss point 1 of element 447 (301:MRT2 (Max))



### *Poikittaispalkkien leikkausrasitukset murtorajatilassa*

Oikea reuna

TARKASTELU MURTORAJATILASSA								
Tutkittava malli	Laattapalkkimalli							
Tutkittava kohta	b x h (mm)	teräkset	rasitus		kapasiteetti		käyttöaste	
ylälaatan alapinta pitkittäin	1000 x 180	T10 k300	18,1	kNm	12,8	kNm	141,4	%
ylälaatan alapinta poikittainen	1000 x 180	T10 k125	20,2	kNm	30,1	kNm	67,1	%
ylälaatan yläpinta pitkittäinen	1000 x 180	T8 k300	25,5	kNm	8,3	kNm	307,2	%
ylälaatan yläpinta poikittainen	1000 x 180	T10 k250	16,7	kNm	15,4	kNm	108,4	%
ylälaatta leikkaus	1000 x 180		114	kN	95	kN	120	%
Pitkittäispalkkien alapinta	340 x 1610	8 T28 + (2 T25 + 2 T28)	1024	kNm	3270	kNm	31,3	%
Poikittäispalkkien alapinta	250 x 1610	2 T28 + 2 T 25 + (2 T28)	175,7	kNm	1655	kNm	10,6	%
Pitkittäispalkkien leikkaus	340 x 1610	haat T12 k250	573,7	kN	748	kN	76,7	%
Poikittäispalkkien leikkaus	250 x 1610	haat T10 k300	143,9	kN	481	kN	29,9	%
Taipuma			taipuma		sallittu		käyttöaste	
ylälaatta			2,79	mm	2,73	mm	102,2	%
pitkittäispalkit			2,61	mm	28,5	mm	9,2	%
poikittäispalkit			2,34	mm	2,73	mm	85,7	%

*Laattapalkkimallin kootut rasitukset ja käyttöasteet murtorajatilassa*

TARKASTELU KÄYTTÖRAJATILASSA / HALKEILUA VASTAAN								
Tutkittava malli	Laattapalkkimalli							
Tutkittava kohta	b x h	teräkset	rasitus		kapasiteetti		käyttöaste	
ylälaatan alapinta pitkittäin	1000 x 180	T10 k300	16,7	kNm	7,9	kNm	211,4	%
ylälaatan alapinta poikittainen	1000 x 180	T10 k125	18,2	kNm	32,2	kNm	56,5	%
ylälaatan yläpinta pitkittäin	1000 x 180	T8 k300	20,2	kNm	4,2	kNm	481,0	%
ylälaatan yläpinta poikittainen	1000 x 180	T10 k250	14,0	kNm	11,0	kNm	127,3	%
Pitkittäispalkkien alapinta	340 x 1610	8 T28 + (2 T25 + 2 T28)	856	kNm	4556	kNm	18,8	%
Poikittaisspalkkien alapinta	250 x 1610	2 T28 + 2 T25 + (2 T28)	121,6	kNm	2050	kNm	5,9	%

*Laattapalkkimallin kootut rasitukset ja käyttöasteet käyttörajatilassa*

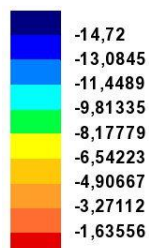
Kotelopalkkimallin rasituskuviot:

Enveloping on: Mx(B)

MRT (Min)

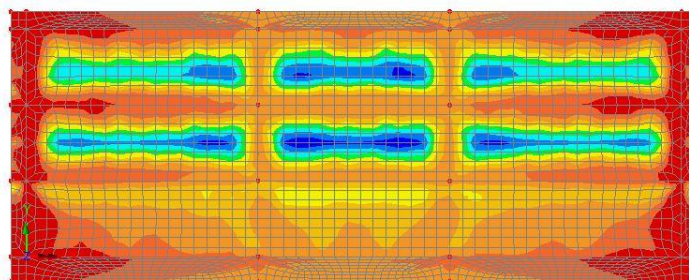
Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: Mx(B) (Units: kN.m/m)



Maximum 0,0 at node 2443 (267:MRT1 (Max))

Minimum -14,72 at node 3760 (302:MRT2 (Min))



*Ylälaatan alapinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My(B)

MRT (Min)

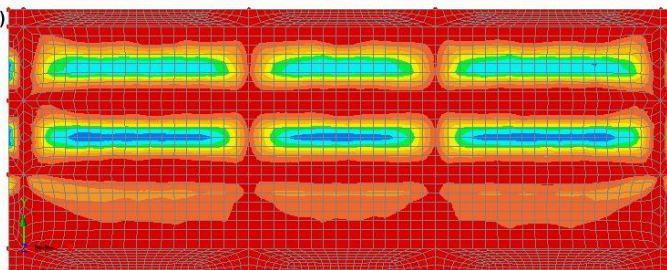
Entity: Force/Moment - Thick Shell

Component: My(B) (Units: kN.m/m)



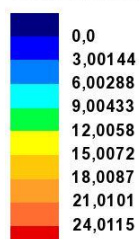
Maximum 0,0 at node 2443 (267:MRT1 (Max))

Minimum -17,8827 at node 3796 (268:MRT1 (Min))

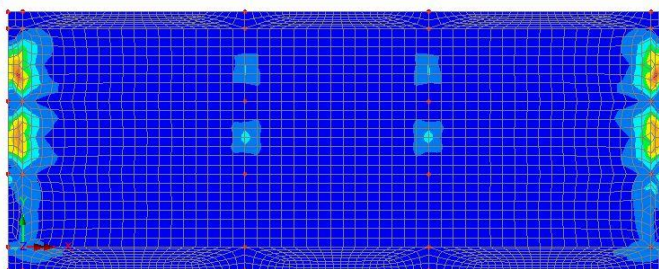


*Ylälaatan alapinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: Mx(T)  
 MRT (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Mx(T) (Units: kN.m/m)



Maximum 27,013 at node 4154 (267:MRT1 (Max))  
 Minimum 0,0 at node 2452 (267:MRT1 (Max))

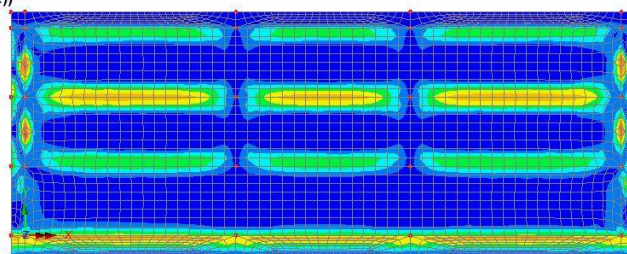


*Ylälaatan yläpinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My(T)  
 MRT (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(T) (Units: kN.m/m)

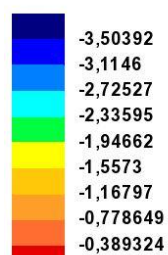


Maximum 22,2073 at node 3733 (301:MRT2 (Max))  
 Minimum 0,0 at node 3219 (267:MRT1 (Max))

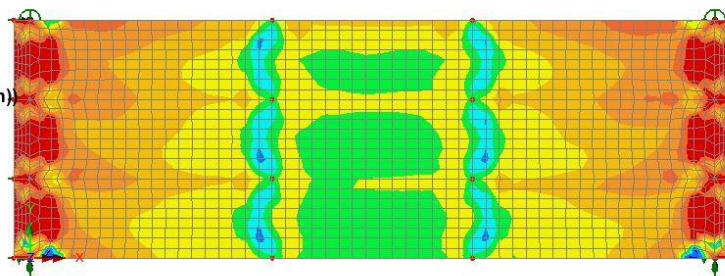


*Ylälaatan yläpinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: Mx(B)  
 MRT (Min)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Mx(B) (Units: kN.m/m)

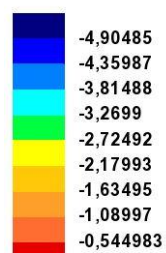


Maximum 0,0 at node 1 (267:MRT1 (Max))  
 Minimum -3,50392 at node 4 (268:MRT1 (Min))

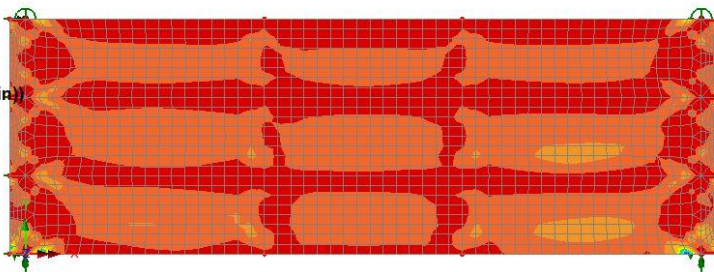


*Alalaatan alapinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My(B)  
 MRT (Min)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(B) (Units: kN.m/m)



Maximum 0,0 at node 2 (267:MRT1 (Max))  
 Minimum -4,90485 at node 52 (268:MRT1 (Min))



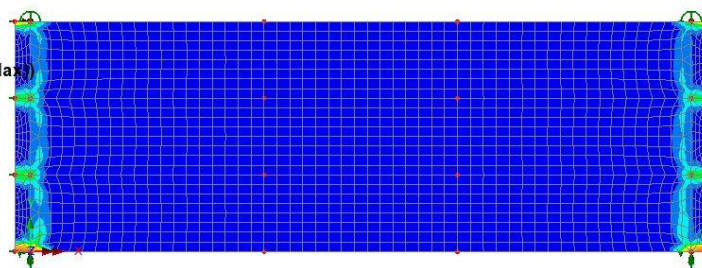
*Alalaatan alapinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*



Enveloping on: Mx(T)  
 MRT (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: Mx(T) (Units: kN.m/m)



Maximum 10,2031 at node 54 (267:MRT1 (Max))  
 Minimum 0,0 at node 4 (267:MRT1 (Max))

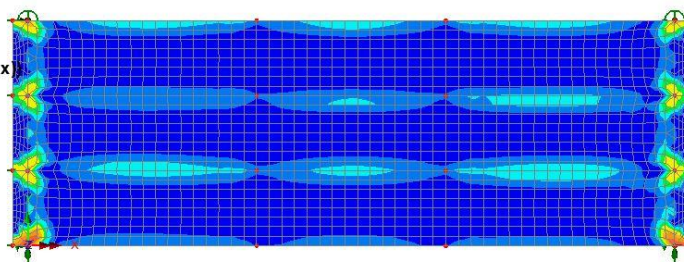


*Alalaatan yläpinnan pitkittäiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

Enveloping on: My(T)  
 MRT (Max)  
 Entity: Force/Moment - Thick Shell  
 Component: My(T) (Units: kN.m/m)



Maximum 6,78916 at node 2 (267:MRT1 (Max))  
 Minimum 0,0 at node 115 (267:MRT1 (Max))



*Alalaatan yläpinnan poikittaiset momenttirasitukset murtorajatilassa*

TARKASTELU MUR- TORAJATILASSA								
Tutkittava malli	kotelopalkkimalli							
Tutkittava kohta	b x h	teräkset	rasitus		kapasiteetti		käyttöaste	
ylälaatan alapinta pitkittäin	1000 x 180	T10 k300	14,72	kNm	12,8	kNm	115,0	%
ylälaatan alapinta poikittainen	1000 x 180	T10 k125	17,88	kNm	30,1	kNm	59,4	%
ylälaatan yläpinta pitkittäin	1000 x 180	T8 k300	27,01	kNm	8,3	kNm	325,4	%
ylälaatan yläpinta poikittainen	1000 x 180	T10 k250	22,21	kNm	15,4	kNm	144,2	%
Alalaatan alapinta pitkittäin	1000 x 140	T8 k300	3,50	kNm	5,9	kNm	59,3	%
Alalaatan alapinta poikittainen	1000 x 140	T10 k200	4,90	kNm	13,7	kNm	35,8	%
Alalaatan yläpinta pitkittäin	1000 x 140	T8 k300	10,2	kNm	5,9	kNm	172,9	%
Alalaatan yläpinta poikittainen	1000 x 140	T8 k200	6,79	kNm	8,9	kNm	76,3	%

*Kotelopalkkimallin kootut rasitukset ja käyttöasteet murtorajatilassa*